

MODEL SYMULACYJNY RUCHU POCISKU PO JEGO WYLOCIE Z PRZEWODU LUFY

SIMULATIVE MODEL OF THE MOVEMENT OF A PROJECTILE AFTER LEAVING THE BARREL

W artykule przedstawiono jeden ze sposobów rozwiązania głównego problemu balistyki zewnętrznej. Zwrócono szczególną uwagę na istotę tego zagadnienia w aspekcie skuteczności zastosowania działka lotniczego. Jako narzędzie do rozwiązania przedstawionego zagadnienia wykorzystano specjalistyczne oprogramowanie CFD-FASTRAN. Obiektem badań był pocisk artyleryjski wystrzelony z działka lotniczego.

Słowa kluczowe: działko lotnicze, pocisk artyleryjski, symulacja, CFD-FASTRAN

In the article was presented the way to solve the main issue of external ballistics. There paid the attention to the essence of the matter of effectiveness of the use air aviation cannons. The problem was solved by using the specialist software CFD-FASTRAN. The research object was the artillery shell launched from aircraft gun.

Keywords: aviation cannon, artillery projectile, simulation, CFD-FASTRAN

1. Wstęp

Jednym z elementów wyposażenia bojowego wojskowych statków powietrznych są działka (szybkostrzelne armaty automatyczne) i karabiny lotnicze. Stanowią one zwykle autonomiczną część pokładowego systemu uzbrojenia lotniczego statku powietrznego i dzięki zastosowaniu odpowiedniej amunicji mogą być użyte zarówno do zwalczania celów powietrznych, jak i różnego rodzaju celów naziemnych. Cecha ta sprawia, że są wykorzystywane w szerokim zakresie. Uzasadnia to też potrzebę prowadzenia badań związanych z analizą czynników wpływających na pogorszenie wartości podstawowych parametrów użytkowych oraz udoskonaleniem procesu eksploatacji lotniczej broni lufowej. Do grupy podstawowych parametrów użytkowych tego rodzaju broni zaliczyć możemy m.in. żywotność lufy, szybkostrzelność, donośność. Możliwość wpływania na wartości tych parametrów, stanowi podstawę do lepszego wykorzystania „potencjalnego zasobu pracy” lotniczej broni lufowej w różnych warunkach eksploatacyjnych.

W trakcie procesu eksploatacyjnego występuje szereg przyczyn, takich jak np. zła obsługa techniczna, występowanie nadmiernych luzów pomiędzy wzajemnie pracującymi elementami, itp., mających negatywny wpływ na warunki pracy działka. To oddziaływanie bezpośrednio przekłada się na wartości wskaźników eksploatacyjnych takich, jak:

1. Introduction

The aviation barrel armament is usually an autonomous component of the onboard aircraft weaponry system. Nowadays, the military aircrafts are fitted with aviation cannons and machine guns, which, thanks to proper ammunition, can be used for destroying both aerial and surface targets. This feature causes the onboard barrel armament to be broadly implemented. Moreover, the research on improvement and development of a new weapon system are vital, as well as evaluation of symptoms and reasons of their essential technical parameters and performance deterioration. For these parameters the following indexes can be pointed out: barrel lifetime, fire rate, fire range etc. The possibility of having influence on the parameter of these values is the base for more effective use “potential operation capability” of the aviation barrel armament in various conditions of its application.

During the service process many reasons appear, such as poor technical service, the occurrence of excess clearance between working elements, etc., which have a negative impact on the cannon operation conditions. This impact has direct influence on the value of service indexes, such as:

- durability;
- reliability;
- projectile dispersion.

- trwałość;
- niezawodność;
- rozrzut.

Dysponując wartościami wymienionych parametrów można dokonać liczbowej oceny walorów eksploatacyjnych działek lotniczych.

Aspekt taktycznego zastosowania broni lufowej prawie zawsze związany jest z uzyskaniem określonego efektu w postaci niszczącego oddziaływania czynnika rażącego na wybrany cel. Analiza tego zagadnienia realizowana jest poprzez przyjęcie wskaźnika umożliwiającego dokonanie oceny i wyznaczenie jego wartości. Jednym ze wskaźników stosowanych do oceny skuteczności użycia środka bojowego jest prawdopodobieństwo porażenia celu. Jego określenie opiera się na znajomości rozmiarów celu oraz wielkość rozrzutu. Z kolei wartość opisująca rozrzut środków bojowych bardzo często używana jest jako wskaźnik służący do oceny realizacji zadania bojowego. Innym wskaźnikiem, stosowanym do oceny skuteczności realizacji misji taktycznej z użyciem lotniczych środków bojowych jest prawdopodobieństwo trafienia w cel. A zatem, analiza skuteczności użycia środka bojowego może być oparta na znajomości wielkości rozrzutu, prawdopodobieństwa trafienia w cel lub też prawdopodobieństwa porażenia celu.

Najistotniejszym aspektem realizacji procesu ataku przez wojskowy statek powietrzny jest zapewnienie takich warunków ataku, aby pocisk trafił w cel. Dokładność tego procesu uwarunkowana jest wieloma czynnikami związanymi m.in. z bronią, statkiem powietrznym, warunkami w jakich realizowane jest zadanie bojowe.

Do czynników związanych z bronią, które pogarszają warunki realizacji zadania bojowego możemy zaliczyć nadmierne zużycie przewodu lufy, zmiana geometrii lufy, niewłaściwe zamocowanie.

Wszystkie te czynniki wpływają na wartości początkowe parametrów ruchu pocisku, do których możemy zaliczyć jego prędkość początkową, kąt wylotu pocisku z przewodu lufy, czy też siły boczne występujące podczas opuszczania przez pocisk przewód lufy. Wyznaczając te parametry i uzależniając je od zmian wartości wielkości charakteryzujących wpływ powyższych czynników, możemy przeprowadzić analizę wpływu parametrów początkowych ruchu na wartość współrzędnych punktu upadku pocisku, a co za tym idzie określić wielkość powstałego rozrzutu.

Realizacja badań eksperymentalnych mających na celu określenie parametrów charakteryzujących tor lotu pocisku jest bardzo trudna. Przyczyną tego są warunki, w jakich następuje użycie lotniczej broni lufowej. Z tego też względu w analizie tego typu zagadnień wykorzystywane jest specjalizowane oprogramowanie umożliwiające symulację ruchu obiektu

Possessing the mentioned parameters enables determining the exact values of the servicing advantage of the aviation cannon evaluation. Implementation of the barrel armament is almost always connected with a specific effect, in the form of a devastating impact on a selected target. The analysis of this effect is conducted through the acceptance of an index that allows carrying out an evaluation and to determine its values. One of the indexes used to evaluate the combat effectiveness of the military asset is the probability of striking the target. In practice, the effectiveness evaluation of a given military asset is based on the knowledge of the target's dimensions as well as the values of the projectile dispersion. Another index used to evaluate combat effectiveness with the use of aerial military assets is the probability of hitting the target. So, the analysis of effective usage of the ammunition can be based on the knowledge of the projectile dispersion, hit probability or kill probability of the target.

The most important aspect of carrying out the attack process by military aircraft is assuring such attack conditions so that the projectile hit the target. Precision and success of this process depends on a variety of factors involved that are: arms, aircraft, conditions, in which combat mission are carried out.

Factors, which deteriorate conditions of carrying out combat missions, involving arms are: excessive wear of the barrel, permanent barrel geometry change, improper fixing of the cannon.

All of the above-mentioned elements have an impact on the initial parameters of the projectile movement, which includes initial velocity, the angle of the projectile discharge from the barrel or other forces that accompany the projectile when discharging from the barrel. After calculating these parameters and making them dependant on specific factors, an analysis can be carried out of the impact of initial movement parameters on the coordinates of the hit point and then determine an estimation of the projectile dispersion value.

Execution of the tests, which aim is to specify parameters characterising the path of the projectile is very difficult. The reason for this is the conditions in which the barrel armament is applied. Modern computer techniques are one of the methods used that allow the simulation of an object's movement in space with defined physical properties. The possibility of creating a virtual model of an existing technical object and submitting it to specific tests is a significant progress in the process of evaluating such type of phenomena. Presented in this article is a three dimensional simulation model of an artillery projectile after its discharge from a barrel. This task

w przestrzeni o zdefiniowanych właściwościach fizycznych. Możliwość opracowania cyfrowego modelu pocisku i poddaniu go badaniom mającym na celu określenie odpowiedzi, na zadane warunki początkowe, jest istotnym postępowaniem w procesie analizy tego typu zjawisk. Dysponując odpowiednim „narzędziem” postanowiono opracować wirtualny model umożliwiający przeprowadzenie symulacji ruchu pocisku po jego wylocie z przewodu lufy. Do realizacji tego zadania wykorzystano pakiet programowy CFD-FASTRAN.

Realizacja powyższego tematu stanowi podstawę do dalszych prac związanych z określaniem skuteczności zastosowania szybkostrzelnych armat automatycznych w aspekcie zmian określonych parametrów użytkowych.

2. Charakterystyka programu CFD-FASTRAN

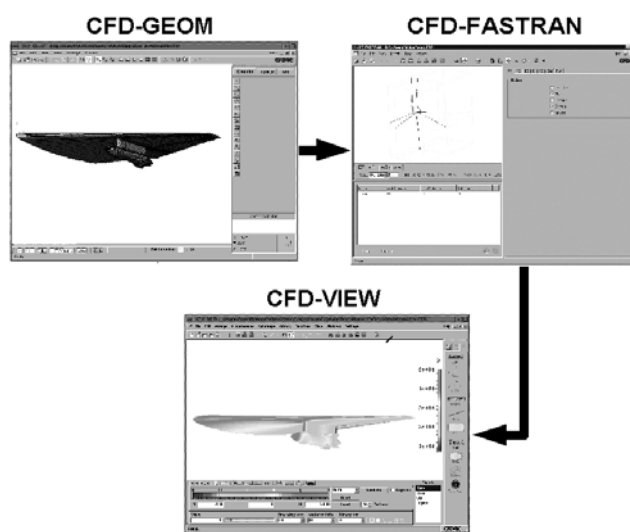
CFD-FASTRAN jest programem z dziedziny CFD (Computational Fluid Dynamics) przeznaczonych do analizy zagadnień aerodynamicznych i aerotermodynamicznych. Program ten znajduje zastosowanie w badaniu przepływów ściśliwych. Ma on strukturę modułową. W jego skład wchodzi trzy programy, tj. CFD-GEOM, CFD-FASTRAN i CFD-VIEW, stanowiące integralną całość. Program CFD-GEOM umożliwia opracowanie wirtualnego modelu do realizacji procesu symulacyjnego. Wybór właściwych parametrów początkowych symulacji, odnoszących się do analizowanego zjawiska oraz realizacja procesu obliczeniowego odbywa się w programie CFD-FASTRAN. CFD-VIEW umożliwia wizualizację informacji otrzymanych w trakcie realizacji symulacji. Przykładowy widok graficznego interfejsu użytkownika poszczególnych programów oraz kierunek przepływu informacji pomiędzy nimi przedstawia rysunek 1.

was carried out using a professional software package called CFD-FASTRAN.

The realisation of the above-mentioned subject is the basis to carry out further studies involving the determination of the effectiveness of using quick-firing automatic cannons in the aspect of changes of defined usable parameters.

2. The profile of the CFD-FASTRAN software

CFD-FASTRAN is a program in the field of CFD (Computational Fluid Dynamics) designed to analyse aerodynamic and aerothermodynamics questions. This program is used in compressible flux studies. It possesses a modular structure. It contains three programs i.e.: CFD-GEOM, CFD-FASTRAN and CFD-VIEW, which are integrated. The CFD-GEOM program allows creating a virtual model for carrying out a simulation process. The selection of appropriate parameters of initial simulations that apply to the analysed phenomenon as well as the realization of the calculation process is done in the CFD-FASTRAN program. CFD-VIEW allows the visualization of information collected during the realisation of the simulation. An exemplary view of the user interface of each of the programs as well as the direction of information flow between them is presented in fig. 1.



Rys. 1. Schemat strukturalny pakietu programowego CFD-FASTRAN

Fig. 1. Schematic Representation of CFD-FASTRAN

1.1. CFD-GEOM – pre-processor

Program CFD-GEOM służy do generacji geometrii obiektu oraz siatki obliczeniowej modelu. Tworzenie modelu do obliczeń oparte jest na generacji siatki (przestrzeni) obliczeniowej otaczającej rozpatrywany obiekt. Jej rozmiar oraz kształt zależy od geometrii obiektu badań. Cała siatka jest zbiorem n elementów o skończonej objętości.

Symulacja ruchu związana jest wygenerowaniem dwóch odrębnych siatek: ruchomej i nieruchomej. Pierwszą z nich jest siatka tworząca otoczenie badanego obiektu i ulegająca przemieszczeniu wraz z nim. Druga natomiast stanowi swoistą bazę odniesieniową, w której następuje przemieszczanie siatki ruchomej wraz z obiektem badań.

2.2. CFD-FASTRAN – procesor

Program ten, określany mianem procesora, jest najistotniejszym elementem pakietu programowego rozwiązującym równania opisujące przepływ. W jego środowisku następuje wprowadzenia wartości niezbędnych parametrów początkowych oraz wybór właściwych metod obliczeniowych do realizacji symulacji. Podstawowymi wielkościami, których wartości należy określić są:

- wektor prędkości \vec{V} ;
- ciśnienie p ;
- temperatura T ;
- kąt natarcia α .

Wielkości te odnoszą się do powierzchni brzegowych siatki determinując w ten sposób własności strumienia przepływu. Określenie parametrów wejściowych, w odniesieniu do siatki ruchomej, związane jest z identyfikacją stanu początkowego obiektu badań (położenie środka masy, momenty bezwładności), przyjęciu rodzaju wymuszeń oddziaływujące na niego oraz określeniu więzów ograniczających ruch obiektu badań.

2.3. CFD-VIEW – post-processor

CFD-VIEW jest programem umożliwiającym wizualizację otrzymanych wyników. W znaczący sposób ułatwia zrozumienie zjawisk oraz interpretację wyników obliczeń. Przy jego pomocy można odwzorować określone wielkości, uzyskane w wyniku symulacji. W tym celu nanosi się na daną powierzchnię kolory lub wykreśla się kontury odpowiadające wartościom przedstawianego parametru. Ponadto dostępne narzędzia zapewniają precyzyjne określenie wartości wybranego parametru w dowolnym punkcie przestrzeni obliczeniowej.

1.1. CFD-GEOM – pre-processor

The CFD-GEOM program is used to generate the geometry of the object and the grid of the model. The creation of the model for calculations is based on the generation of the grid (space) surrounding this object. Its size and shape depend on the geometry of the object. The whole grid is a set of n elements with a finite volume.

Simulation of the movement is related with generating two separate grids: movable and fixed. The first grid creates the research space of object and moves with this object. However, the second grid is the special base of reference, in which the displacement of the moveable grid and research object take place.

2.2. CFD-FASTRAN – processor

This program is called the processor, it is the most important element of software package, which solves equations describing flow. In this program necessary values of initial parameters are entered as well as the selection of suitable calculation methods for carrying out simulation are made. Basic values, which should be stated, are:

- vector velocity \vec{V} ;
- pressure p ;
- temperature T ;
- angle α .

These sizes apply to the edge surfaces of the grid, which determining the property of the stream flow. Specifying the input parameters, in reference to the movable grid is connected with identifying the initial state of the research object (the position of the centre of mass, the moments of inertia), selecting the type of input function, which affects it and the defining of constraints restricting the movement of the research object.

2.3. CFD-VIEW – post-processor

CFD-VIEW is a program, which enables the visualisation of received results. It makes it considerably easy to understand the effects and interpretation of calculated results. With its help specific sizes, achieved from the simulation, can be mapped. Thus, the given surface is coloured or a contour is drawn in correspondence with the value of the presented parameter. Moreover, the available tools assure precise specification of a chosen parameter value in any point of computational space.

3. Model fizyczny obiektu badań

Jako obiekt badań przyjęto pocisk OFZ-30NR (rys. 2) wystrzeliwany z działka NR-30 eksploatowanego na samolocie Su-22. Dysponując instrukcjami eksploatacyjnymi oraz opisem technicznym i rzeczywistym obiektem, wyznaczono następujące charakterystyki:

- geometrycznych (wymiary liniowe pocisku);
- masowych (położenie środka masy);
- bezwładnościowych (momenty bezwładności pocisku).

Wartości wymienionych parametrów stanowią dane niezbędne do realizacji procesu symulacyjnego. Do wyznaczenia charakterystyk masowych i bezwładnościowych posłużono się programem komputerowym Solid Edge, budując w jego środowisku wirtualny model pocisku (rys. 3) oraz określając rozkład masy poszczególnych jego elementów.



Rys. 2. Widok pocisku OFZ-30NR
Fig. 2. View of projectile OFZ -30NR

4. Model matematyczny

Model matematyczny umożliwiający realizację procesu symulacyjnego zawarty został w kodzie źródłowy oprogramowania CFD-FASTRAN. Opis procesu wyznaczania parametrów charakteryzujących przepływ można przedstawić (w formie uproszczonej) w oparciu o rozwiązanie równań: masy (1), pędu (2) i energii strumienia przepływu (3) [1]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

gdzie: ρ – gęstość strumienia przepływu, \vec{V} – prędkość strumienia przepływu.

$$\iiint_W \rho \frac{d\vec{V}}{dt} dW = \iiint_W \rho \vec{F} dW + \iint_S \vec{p}_n dS \quad (2)$$

gdzie: W – obszar płynu, S – powierzchnia kontrolna płynu, \vec{F} – jednostkowa siła masowa, \vec{p}_n – wektor naprężeń.

$$\iiint_W \rho \frac{d}{dt} \left(c_v T + \frac{V^2}{2} \right) dW = \iint_S \vec{p}_n \vec{V} dS + \iiint_W \rho \vec{F} \vec{V} dW + \iiint_W \rho q dW + \iint_S \lambda \frac{dT}{dn} dS \quad (3)$$

gdzie: c_v – ciepło właściwe przy stałej objętości, T – temperatura bezwzględna, q – ciepło strumienia, λ – przewodność cieplna.

3. Physical model of research object

The OFZ-30NR projectile (fig. 2) was used as the object of research, which was fired from a NR-30 aviation cannon used in Su-22 aircraft. With the disposal of the user manual, technical reference and the actual object the following characteristics were stated:

- geometrical (the linear dimensions of the projectile)
- mass (the position of centre of mass)
- inertial (moments of inertia)

The values of these parameters compose indispensable data for carrying out the simulation process. To calculate mass and inertial characteristics the Solid Edge computer program was used for building a virtual model of the projectile (fig. 3) as well as defining the distribution of mass of its individual elements.

Figure. 2. View of projectile OFZ -30NR
Figure. 3. View of OFZ -30NR projectile virtual mode



Rys. 3. Widok modelu wirtualnego pocisku OFZ-30NR
Fig. 3. View of OFZ -30NR projectile virtual mode

4. Mathematical model

The mathematical model helps in the realisation of the simulation process, which is included in the source code of the CFD-FASTRAN software. The description of the process of determining parameters that characterise the flow can be presented (in simplified form) based on the solution of equations of: mass (1), speed (2) and the energy of stream of flow (3) [1]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

where: ρ – the flux density, \vec{V} – the speed of stream of flow.

$$\iiint_W \rho \frac{d\vec{V}}{dt} dW = \iiint_W \rho \vec{F} dW + \iint_S \vec{p}_n dS \quad (2)$$

where: W – the area of liquid, S – the control surface of liquid, \vec{F} – elementary mass strength, \vec{p}_n – the vector of strain.

where: c_v – specific heat near constant volume, T – absolute temperature, q – heat stream, λ – thermal conductance.

Rozwiązując powyższe równania wyznaczone są wartości ciśnienia, prędkości, temperatury itp. wielkości. Powyższe równania wykorzystywane są zarówno dla przypadku analizy zagadnienia, w którym nie jest rozpatrywany ruch pocisku, jak i w sytuacji gdy ruch ten występuje, tzn. następuje przemieszczenie się pocisku i siatki ruchomej względem siatki nieruchomej.

Do modelowania zagadnienia ruchu pocisku wykorzystywane są równania opisujące ruch swobodny ciała. Równania ruchu dla ciała sztywnego o stałej masie i masowych momentach bezwładności jakim jest pocisk artyleryjski są określane przez wzory (4) i (5) [2]:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \vec{h}}{\partial t} + \vec{\omega} \times \vec{h} = \vec{M} \quad (5)$$

gdzie: \vec{F} – wektor siły, \vec{M} – wektor momentu względem środka ciężkości, m – masa pocisku, \vec{v} – prędkość liniowa środka masy, $\vec{h} = \hat{I}\vec{\omega}$ – moment pędu, $\vec{\omega}$ – prędkość kątowa układu współrzędnych związanego z pociskiem.

W analizowanym przypadku ruch pocisku opisany został poprzez określenie jego sześciu stopni swobody. Główne etapy opisujące przemieszczenie pocisku wraz z siatką ruchoma można scharakteryzować przy pomocy następującego algorytmu:

- A. Rozpatrywane jest ciało sztywne (pocisk) w chwili początkowej t_0 z prędkościami liniowymi v_x^0, v_y^0, v_z^0 , z prędkościami kątowymi $\omega_x^0, \omega_y^0, \omega_z^0$ i z momentami pędu h_x^0, h_y^0, h_z^0 .
- B. W kolejnym kroku, dla czasu $t_0 + \Delta t$, wyznaczone jest rozwiązanie równań opisujących przepływ, w którym porusza się pocisk. Wykorzystując powyższe rozwiązanie wyliczane są powstałe w czasie $t_0 + \Delta t$ siły $\vec{F}(F_x, F_y, F_z)$ i momenty $\vec{M}(M_x, M_y, M_z)$. W rozpatrywanym przypadku uwzględniono występowanie sił i momentów aerodynamicznych oraz siłę grawitacji.
- C. Wykorzystując wartości sił, wyznacza się przyspieszenia liniowe, prędkości i przemieszczenie ciała w czasie $t_0 + \Delta t$ w inercjalnym układzie odniesienia:

$$v_x^{t_0 + \Delta t} = v_x^0 + \Delta t \cdot \frac{F_x^{t_0 + \Delta t}}{m} \quad (6)$$

$$v_y^{t_0 + \Delta t} = v_y^0 + \Delta t \cdot \frac{F_y^{t_0 + \Delta t}}{m} \quad (7)$$

$$v_z^{t_0 + \Delta t} = v_z^0 + \Delta t \cdot \frac{F_z^{t_0 + \Delta t}}{m} \quad (8)$$

By solving the above-mentioned equations the values of pressure, speed, temperature etc. are determined. The above-mentioned equations are used both in case of question analysis, in which the movement of the projectile is not under examination as well as in the situation when this movement exists. The displacement of the projectile and movable grid follows in relation to the fixed grid.

In analysed event the movement of projectile was described by qualification six degrees of latitude. The 6DOF motion model requires additional information to determine how its body moves based on the physical properties and forces and movements. This achieved through the general equations of unsteady motion. The equations of motion for a rigid body with constant mass and mass moments of inertia are given by [2]:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \vec{h}}{\partial t} + \vec{\omega} \times \vec{h} = \vec{M} \quad (5)$$

where: \vec{F} – the resultant force vector of all forces (aerodynamic, point thrust, etc.), \vec{M} – the moment vector about the body center of gravity, m – the body mass, \vec{v} – linear velocity of the center of gravity, $\vec{h} = \hat{I}\vec{\omega}$ – the momentum of the momentum, $\vec{\omega}$ – the angular velocity about the body's center of gravity.

The 6DOF module involves solving the six scalar equations by a suitable numerical method in order to obtain the displacements and velocities from the force and moments. The essential steps involved in this computation are as follows:

- A. Consider the rigid body in an initial state at time t_0 with linear velocities v_x^0, v_y^0, v_z^0 , angular velocities $\omega_x^0, \omega_y^0, \omega_z^0$ and angular moments h_x^0, h_y^0, h_z^0 .
- B. Obtain the numerical solution at time $t_0 + \Delta t$ for the flow field in which the body is moving. Using this, compute the resultant force $\vec{F}(F_x, F_y, F_z)$ and the moment $\vec{M}(M_x, M_y, M_z)$ at time $t_0 + \Delta t$ by summing the effects of aerodynamics and gravity external forces/moments.
- C. Integrate the forces numerically to obtain the linear accelerations, velocities and displacements of the body at time $t_0 + \Delta t$. These quantities are referred to the inertial frame.

$$v_x^{t_0 + \Delta t} = v_x^0 + \Delta t \cdot \frac{F_x^{t_0 + \Delta t}}{m} \quad (6)$$

$$v_y^{t_0 + \Delta t} = v_y^0 + \Delta t \cdot \frac{F_y^{t_0 + \Delta t}}{m} \quad (7)$$

$$v_z^{t_0 + \Delta t} = v_z^0 + \Delta t \cdot \frac{F_z^{t_0 + \Delta t}}{m} \quad (8)$$

$$\delta x^{t_0+\Delta t} = \frac{(v_x^{t_0+\Delta t} + v_x^{t_0})\Delta t}{2} \quad (9)$$

$$\delta y^{t_0+\Delta t} = \frac{(v_y^{t_0+\Delta t} + v_y^{t_0})\Delta t}{2} \quad (10)$$

$$\delta z^{t_0+\Delta t} = \frac{(v_z^{t_0+\Delta t} + v_z^{t_0})\Delta t}{2} \quad (11)$$

D. Wykorzystując wartości momentów, następuje wyznaczenie składowych momentu pędu, prędkości kątowych i kątów obrotu pocisku w czasie $t_0+\Delta t$ w układzie odniesienia związanym z pociskiem:

$$h_x^{t_0+\Delta t} = h_x^{t_0} + (M_x^{t_0+\Delta t} - \omega_y^{t_0} h_z^{t_0} + \omega_z^{t_0} h_y^{t_0})\Delta t \quad (12)$$

$$h_y^{t_0+\Delta t} = h_y^{t_0} + (M_y^{t_0+\Delta t} - \omega_z^{t_0} h_x^{t_0} + \omega_x^{t_0} h_z^{t_0})\Delta t \quad (13)$$

$$h_z^{t_0+\Delta t} = h_z^{t_0} + (M_z^{t_0+\Delta t} - \omega_x^{t_0} h_y^{t_0} + \omega_y^{t_0} h_x^{t_0})\Delta t \quad (14)$$

$$\begin{cases} \omega_x^{t_0+\Delta t} \\ \omega_y^{t_0+\Delta t} \\ \omega_z^{t_0+\Delta t} \end{cases} = \begin{bmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \begin{cases} h_x^{t_0+\Delta t} \\ h_y^{t_0+\Delta t} \\ h_z^{t_0+\Delta t} \end{cases} \quad (15)$$

$$\delta \Theta_x^{t_0+\Delta t} = \frac{(\omega_x^{t_0+\Delta t} + \omega_x^{t_0})\Delta t}{2} \quad (16)$$

$$\delta \Theta_y^{t_0+\Delta t} = \frac{(\omega_y^{t_0+\Delta t} + \omega_y^{t_0})\Delta t}{2} \quad (17)$$

$$\delta \Theta_z^{t_0+\Delta t} = \frac{(\omega_z^{t_0+\Delta t} + \omega_z^{t_0})\Delta t}{2} \quad (18)$$

E. Wykorzystując obliczone w ten sposób przemieszczenia liniowe $(\delta x^{t_0+\Delta t}, \delta y^{t_0+\Delta t}, \delta z^{t_0+\Delta t})$ i kątowe $(\delta \Theta_x^{t_0+\Delta t}, \delta \Theta_y^{t_0+\Delta t}, \delta \Theta_z^{t_0+\Delta t})$ następuje przemieszczenie siatki modelu o wyznaczone wartości.

Opisany proces przedstawia algorytm wyliczenia wartości wielkości umożliwiających realizację symulacji ruchu siatki ruchomej, związanej z obiektem badań, względem siatki nieruchomej.

5. Proces symulacyjny

Przystępując do określenia parametrów wejściowych i uruchomienia symulacji w pierwszej kolejności dokonano charakterystyki obiektu badań celem wyznaczenia jego danych masowych oraz ustalenia wartości początkowej prędkości liniowej i kątowej pocisku. Dane te umożliwiły wypracowanie właściwych założeń upraszczających realizację procesu użycia artyleryjskiego środka bojowego. W oparciu o te dane przyjęto następujące założenia:

- ruch pocisku analizowany będzie od chwili opuszczenia przez niego przewodu lufy;
- na dno pocisku nie oddziałują gazy procho-we;

$$\delta x^{t_0+\Delta t} = \frac{(v_x^{t_0+\Delta t} + v_x^{t_0})\Delta t}{2} \quad (9)$$

$$\delta y^{t_0+\Delta t} = \frac{(v_y^{t_0+\Delta t} + v_y^{t_0})\Delta t}{2} \quad (10)$$

$$\delta z^{t_0+\Delta t} = \frac{(v_z^{t_0+\Delta t} + v_z^{t_0})\Delta t}{2} \quad (11)$$

D. Integrate the moments to obtain the angular momentum, angular rates and rotations of the body at time $t_0+\Delta t$. These quantities are referenced to the body-fixed frame.

$$h_x^{t_0+\Delta t} = h_x^{t_0} + (M_x^{t_0+\Delta t} - \omega_y^{t_0} h_z^{t_0} + \omega_z^{t_0} h_y^{t_0})\Delta t \quad (12)$$

$$h_y^{t_0+\Delta t} = h_y^{t_0} + (M_y^{t_0+\Delta t} - \omega_z^{t_0} h_x^{t_0} + \omega_x^{t_0} h_z^{t_0})\Delta t \quad (13)$$

$$h_z^{t_0+\Delta t} = h_z^{t_0} + (M_z^{t_0+\Delta t} - \omega_x^{t_0} h_y^{t_0} + \omega_y^{t_0} h_x^{t_0})\Delta t \quad (14)$$

$$\begin{cases} \omega_x^{t_0+\Delta t} \\ \omega_y^{t_0+\Delta t} \\ \omega_z^{t_0+\Delta t} \end{cases} = \begin{bmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \begin{cases} h_x^{t_0+\Delta t} \\ h_y^{t_0+\Delta t} \\ h_z^{t_0+\Delta t} \end{cases} \quad (15)$$

$$\delta \Theta_x^{t_0+\Delta t} = \frac{(\omega_x^{t_0+\Delta t} + \omega_x^{t_0})\Delta t}{2} \quad (16)$$

$$\delta \Theta_y^{t_0+\Delta t} = \frac{(\omega_y^{t_0+\Delta t} + \omega_y^{t_0})\Delta t}{2} \quad (17)$$

$$\delta \Theta_z^{t_0+\Delta t} = \frac{(\omega_z^{t_0+\Delta t} + \omega_z^{t_0})\Delta t}{2} \quad (18)$$

E. Use the displacements $(\delta x^{t_0+\Delta t}, \delta y^{t_0+\Delta t}, \delta z^{t_0+\Delta t})$ and rotations $(\delta \Theta_x^{t_0+\Delta t}, \delta \Theta_y^{t_0+\Delta t}, \delta \Theta_z^{t_0+\Delta t})$ computed above to move the nodes of the grid that models the moving body.

The described process presents an algorithm of calculating the values of sizes that allow the realisation of simulating the movement of the movable grid, which is related with the object of research, in relation to the fixed grid.

5. Simulating process

To state the input parameters and to be able to start the simulation characteristics of the object, research must be carried out first, which aim is to determine its mass data as well as establishing its initial linear velocity and projectile angle. This data enabled elaborating suitable assumptions simplifying the realisation of the process of using artillery military assets. Based on this data the following assumptions were established:

- movement of the projectile is to be analysed at the moment when it leaves from the barrel.
- powder gases do not act on the bottom of the projectile.

- pocisk porusza się z prędkością początkową $V_0=780$ [m/s];
- prędkość obrotowa pocisku wynosi $\omega=1090$ [obr/s];
- na pocisk oddziałują siła i moment aerodynamiczny oraz siła grawitacji;
- ruch pocisku odbywa się w przestrzeni obliczeniowej, w której prędkość strumienia przepływu wynosi $V=136$ [m/s] (w ten sposób zamodelowano ruch postępowy statku powietrznego podczas użycia artyleryjskich środków bojowych w trakcie realizacji misji taktycznej);
- ruch pocisku odbywa się w środowisku o charakterze turbulentnym.

Głównymi czynnikami determinującymi przyjęcie powyższych założeń były oprogramowanie oraz platforma sprzętowa wykorzystywana do obliczeń. Przyjęte wytyczne odnoszą się zarówno do przestrzeni obliczeniowej, reprezentowanej przez siatkę obliczeniową, w obrębie której przemieszcza się pocisk, jak i parametrów ruchu pocisku.

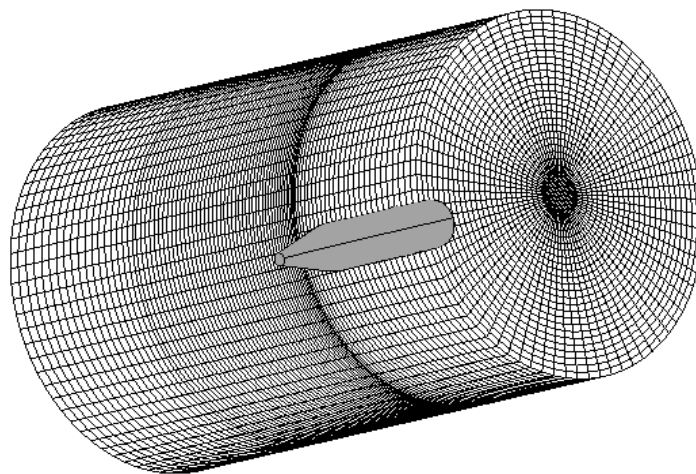
Określenie wartości parametrów wejściowych do rozwiązania sformułowanego zagadnienia stanowiło zakończenie pierwszego etapu (przygotowawczego), po którym przystąpiono do tworzenia modelu obliczeniowego. Istotnym elementem generowania geometrii obiektu było wyznaczenie właściwego podziału powierzchni pocisku. Na jego podstawie dokonano rozmieszczenia poszczególnych obszarów siatki obliczeniowej. Geometrię pocisku podzielono na 6 stref co sprawiło, że wszystkie obszary tworzące siatkę ruchomą stanowiły czternaście bloków, mieszcząc w swojej objętości 121410 komórek (rys. 4). Przestrzeń siatki nieruchomej zbudowano w oparciu o kształt prostopadłościanu. Wygenerowano w niej obszar zawierający 167359 komórek ograniczony wymiarami 2x2x6 [m].

- the initial velocity of the projectile is $V_0=780$ [m/sec], it is equivalent to the projectile velocity when it leaves the barrel.
- rotational velocity of the projectile is $\omega=1090$ [rounds/sec].
- aerodynamic force and moment as well as gravitational force acts on the projectile.
- the projectile is moving into calculation space, where the velocity of the flow stream equals $V=136$ [m/sec].
- the projectile is moving through a turbulent flow environment.

The main factors that determine the acceptance of the above-mentioned assumptions were the software and equipment used for calculations. The accepted guidelines refer both to the calculation space represented by the calculation grid, in which the projectile moves and the movement parameters of the projectile.

The preparation stage was completed after determining the input data for the solution of the formulated task, after which a calculation model was created. The key factor of generating the object geometry was determining its topology. The geometry of the projectile was divided into six areas. The sum of all the areas, which created a moving grid, was fourteen blocks, which comprise of 121410 cells (fig. 4). The space of the fixed grid was created based on a rectangular prism, which comprises of 167359 cells and was limited to the following dimensions 2x2x6[m].

The whole calculation process was carried out in two stages, in accordance with the obligatory algorithm in the CFD-FASTRAN program. The first stage concerned the projectile being still. Calculations allowed the flow characteristics to be determined based on the sizes defined on the surfaces that limit the area of the fixed calculation grid (the so-called border layer). These parameters are:



Rys. 4. Widok ruchomej siatki obliczeniowej wraz z obiektem badań
Fig. 4. View of the moveable calculation grid

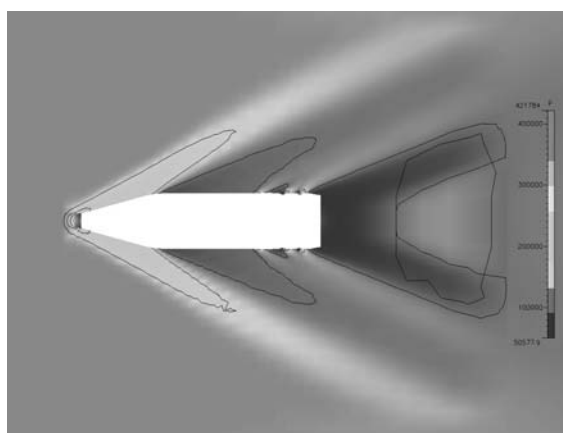
Cały proces obliczeniowy przeprowadzono dwuetapowo według obowiązującego w programie CFD-FASTRAN algorytmu postępowania.

Pierwszy etap obliczeń dotyczył zagadnienia w którym pocisk pozostawał nieruchomy. W wyniku obliczeń wyznaczone zostały wartości charakteryzujące przepływ, w oparciu o wielkości zdefiniowane na powierzchniach ograniczających obszar nieruchomej siatki obliczeniowej (w tzw. warstwie brzegowej). Parametry te to:

- prędkość strumienia przepływu $V=136$ [m/s];
- temperatura $T=293$ [K];
- ciśnienie $p=101325$ [Pa].

Na bazie przyjętych założeń, ruch pocisku opisano przy pomocy równań ruchu ciała sztywnego dla którego określono sześć stopni swobody. W tym celu, jako dane wejściowe do modelu opisującego ruch wprowadzono wartości wyznaczonych wcześniej charakterystyk masowych i bezwładnościowych pocisku oraz parametry charakteryzujące ruch pocisku, tj. wektory początkowej prędkości liniowej i kątowej. Dla tak ustalonych parametrów początkowych ruchu, uruchomiono proces obliczeniowy, w trakcie którego wyznaczano zarówno parametry przepływu, jak i wielkości charakteryzujące ruch pocisku. Po zakończeniu symulacji przystąpiono do analizy otrzymanych wyników.

Wykorzystując program CFD-VIEW zobrazowano rozkład wartości ciśnienia w przestrzeni otaczającej znajdujący się w ruchu pocisk artyleryjski (rys. 5). Na rysunku 6 przedstawiono rozkład ciśnienia na powierzchni pocisku oraz kolejne fazy jego ruchu otrzymane w wyniku obliczeń. Na podstawie otrzymanych wyników wyznaczono przebieg wartości składowej poziomej wektora prędkości (rys. 7) oraz drogę przebytą przez pocisk (rys.8).



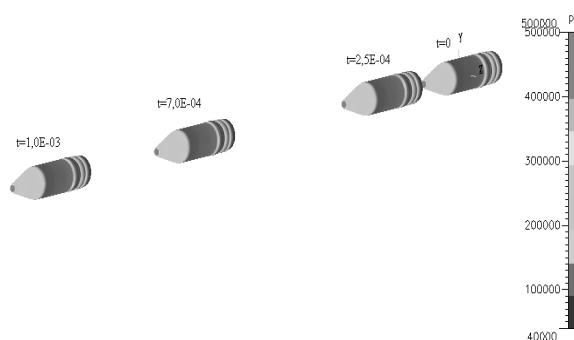
Rys. 5. Rozkład ciśnienia dookoła pocisku artyleryjskiego
Fig. 5. Pressure distribution around the artillery projectile

- stream flow velocity $V=136$ [m/sec];
- temperature $T=293$ [K];
- pressure $P=101325$ [Pa].

Based on the above-mentioned assumptions, the movement of the projectile was described with the help of the equation of motion for an immovable object, for which six degrees of freedom were stated. Therefore, the mass and inertial characteristics values as well as parameters characterising the projectile motion, i.e. linear and angular initial vector velocity, were introduced as input data to the earlier determined model that presented motion. For initial motion parameters defined using this method a calculation process was introduced, during which both stream flow parameters as well as sizes characterising the projectile motion were determined. After completing the simulation the final results were carefully analysed.

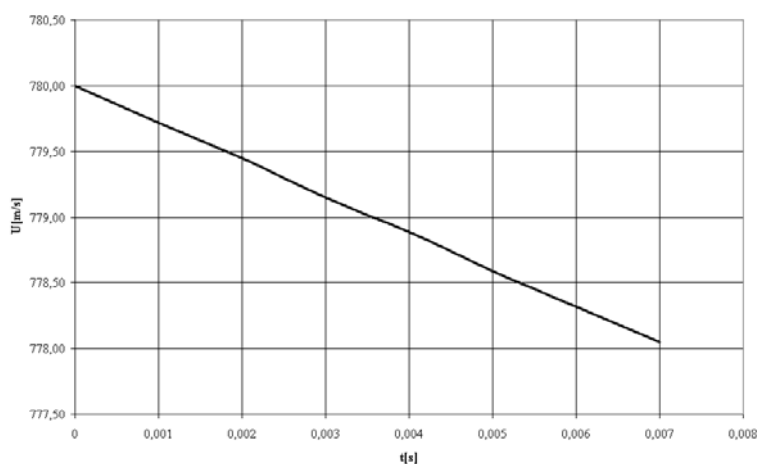
Figure 5 presents the distribution of pressure surrounding the moving artillery projectile in the CFD-VIEW program. Analysis of the pressure distribution around the projectile confirms that the character of change is acceptable. Concentration and rarefaction areas of the flow stream are clearly visible. Figure 6 shows the pressure distribution on the projectile surface as well as the next phases of its movement, which were obtained from the realisation of the simulation.

After processing data recorded in text-type files, some additional parameters were given: a distance covered by the projectile, changes of its linear and angular velocities with respect to the individual axis. Figure 7 presents the diagram of the changes of the vector velocity of the projectile following its axis. Figure 8 shows the distance covered by the projectile.



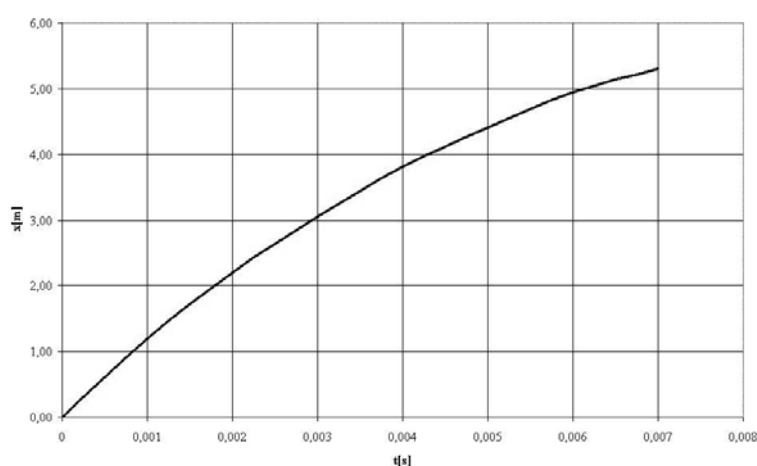
Rys. 6. Rozkład ciśnienia na powierzchni pocisku dla podanych wartości czasu lotu pocisku

Fig. 6. Pressure distribution on surface of bullet for given values of time of projectile flight



Rys. 7. Wykres zmian składowej poziomej wektora prędkości pocisku w funkcji czasu jego lotu

Fig. 7. Change of the horizontal component of the velocity vector



Rys. 8. Wykresy drogi przebytej przez pocisk wzdłuż osi x w funkcji czasu jego lotu

Fig. 8. The Distance covered by the projectile following on the x-axis

6. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań oraz w oparciu o analizę uzyskanych wyników można stwierdzić, że:

- wykorzystując oprogramowanie CFD-FASTRAN oraz dysponując wartościami charakterystyk masowych, geometrycznych i bezwładnościowych, można przeprowadzić symulację ruchu przestrzennego dowolnego typu pocisku;
- z przeprowadzonej analizy rozkładu ciśnienia w przestrzeni otaczającej pocisk (rys. 5), dokonując porównania ich z danymi zamieszczonymi w pozycji [3], wynika, że charakter zachodzących zmian jest poprawny (wyraźnie widoczne są obszary spiętrzania i rozrzedzania strumienia przepływu dookoła obiektu badań);
- istnieje możliwość analizy wpływu oddziaływania takich czynników jak: występowanie siły bocznej podczas wylotu pocisku z lufy, czy też zmiana prędkości wylotowej pocisku spowodowane uszkodzeniem lub zużyciem przewodu lufy, na kształt toru lotu pocisku. Na jej podstawie można określić wartości współrzędnych punktu upadku

6. Conclusion

Based on the execution of simulative models and preliminary tests, the following conclusion can be formulated:

- using the CFD-FASTRAN software as well as having the values of mass, geometrical and inertial characteristics it is possible to realise the simulation of spatial movement of any type of projectile;
- the conducted analysis of pressure distribution surrounding the projectile space (fig. 5), shows that the character of the changes underwent correctly (the areas of piling up and stream flow dilution around the tested object are clearly visible) when compared to data in [3];
- there is possibility of analysing the influence of the reaction of such elements like: the occurrence of a side force during projectile discharge from the barrel, or the change of the discharge speed of the bullet may be caused by damage or wear and tear of the inside of the barrel, on the flight path. On its basis it is possible to state the coordinates values of the point of fall of the projectile, and

pocisku, a w konsekwencji wartość powstałego rozrzutu;

- realizacja tego typu badań wymaga stosowania platformy sprzętowej o znacznej mocy obliczeniowej. Realizacja powyższych obliczeń przeprowadzona została na komputerze klasy PC, który wyposażony był w procesor 1,7 GHz. Proces obliczeniowy trwał 90 dni.

in consequence the value of the formed dispersion;

- realisation of this type of research requires using equipment with considerable computing power. The realisation of above-mentioned calculations was conducted on a PC-class computer equipped with a 1.7 GHz processor. The computing process lasted 90 days.

7. References

- [1] Chlebny B., Sobieraj W., Wrzesień S.: *Mechanika płynów*, WAT, Warszawa 2003r.
- [2] *CFD-FASTRAN Theory manual*, CFD Research Corporation, Huntsville 2002.
- [3] Gacek J.: *Balistyka zewnętrzna, cz. 1 i cz. 2*, Wydawnictwo Wojskowej Akademii Technicznej, Warszawa 1999.
- [4] Idziaszek Z.: *Metody oceny trwałości wybranych elementów działek lotniczych*, WAT (praca doktorska), Warszawa 1999r.
- [5] Idziaszek Z. (współautor): *Analiza czynników determinujących trwałość lufy w aspekcie zwiększenia niezawodności broni*, Referat na konferencję „Amunicja 2002”, Kołobrzeg 2002.
- [6] Ważny M., Jaształ M., Misiorny A.: *CFD – nowe możliwości*, CAD/CAM FORUM nr 12/2000.
- [7] Ważny M., Jaształ M., Misiorny A.: *CFD–GEOM*, CAD/CAM FORUM nr 02/2001.
- [8] Ważny M., Jaształ M., Misiorny A.: *CFD-FASTRAN – wirtualny tunel aerodynamiczny*, CAD/CAM FORUM 3/2001, Warszawa 2001.

Dr inż. Mariusz WAŻNY
Dr inż. Zdzisław IDZIASZEK

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechatroniki
ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa 49
tel. (0-22) 6837947, (22) 6837291, faks (0-22) 6857581
e-mail: mwazny@wp.pl, idziaszek@wmt.wat.edu.pl
