ISSN 1230-3801

Zeszyt 148 nr 4/2018, str. 43- 60
Volume 148 No. 4/2018, pp.43-60

ANALIZA WPŁYWU WYBRANYCH ZABURZEŃ POCZĄTKOWYCH NA ROZRZUT WSZERZ NADDŹWIĘKOWEGO POCISKU MOŹDZIERZOWEGO

INFLUENCE OF SELECTED INITIAL DISTURBANCES INTO THE LATERAL DEFLECTION OF A SUPERSONIC MORTAR PROJECTILE

Tomasz MERDA
Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia, ul. Wyszyńskiego 7, 05-220 Zielonka
Military Institute of Armament Technology, 7 Wyszynski St., 05-220 Zielonka, Poland
Author's e-mail address: merdat@witu.mil.pl

DOI 10.5604/01.3001.0013.1672

Streszczenie: W pracy przeprowadzono analizę wpływu wybranych zaburzeń początkowych na rozrzut wszerz naddźwiękowego pocisku moździerzowego powstałego w ramach programu RAK AMUNICJA. W pierwszej części pracy wytypowano czynniki mogące mieć wpływ na rozrzut wszerz pocisków moździerzowych. Analizowano wpływ parametrów takich jak: początkowa prędkość poprzeczna pocisku, początkowy kąt odchylenia pocisku, początkowa prędkość kątowa odchylenia pocisku oraz krótkotrwały podmuch wiatru poprzecznego. Następnie oszacowano możliwe wartości zaburzeń tych parametrów i wykonano dla tych wartości obliczenia przy prędkości początkowej v_0=500 m/s. Obliczenia prowadzono za pomocą modelu lotu o pięciu stopniach swobody opracowanego dla pocisków moździerzowych. Wyniki obliczeń porównano z rezultatami uzyskanymi analitycznie za pomocą wzoru opisującego wartość podrzutu aerodynamicznego przedstawionego w literaturze. W końcowej części pracy przedstawiono wnioski.

Słowa kluczowe: naddźwiękowy pocisk moździerzowy, balistyka zewnętrzna, rozrzut

Abstract: Influence of selected initial disturbances into the lateral dispersion of a supersonic mortar projectile, developed in the frame of RAK MUNITIONS program, is analysed in the paper. In the first part of the paper some factors which may influence the lateral dispersion of mortar projectiles are indicated. Such parameters of the projectile as initial lateral velocity, initial angle of yaw and initial velocity of the yaw angle, and an unexpected lateral gust of wind were analysed. In the next step the possible values of disturbances for these parameters were estimated to perform the calculations for these values at the muzzle velocity of v_0=500 m/s. The calculations were performed by using a model of flight with five degrees of freedom which was developed for the mortar projectiles. The results of calculations were compared with the analytical results received with a relation presented in the literature for values of aerodynamic jump. The conclusions are presented in the final part of the paper.

Keywords: supersonic mortar projectile, external ballistic, scattering

1. Wstęp

Zjawisko rozrzutu polega na otrzymaniu różnych trajektorii lotu pocisków w czasie strzelania na skutek wpływu przypadkowych przyczyn [1]. Rozrzut pocisków najczęściej traktowany jest jako losowe rozłożenie punktów trafienia serii pocisków wokół średniego punktu upadku ŚPU tej serii. Ułożenie tych punktów wokół ŚPU jest zgodna z rozkładem Gaussa [2]. Przyczynami rozrzutu są różnice wielkości fi-

1. Introduction

An effect of dispersion produces different flight trajectories after firing the projectiles due to the influence of random factors [1]. The dispersion of projectiles is usually described as a random pattern of impact points for a series of projectiles around an average impact point (AIP) of the series. These points are distributed around the AIP according with the Gauss distribution [2]. The dispersion is

zycznych mających wpływ na trajektorie pomiędzy kolejnymi strzałami. Do tych wielkości fizycznych należą m. in.:

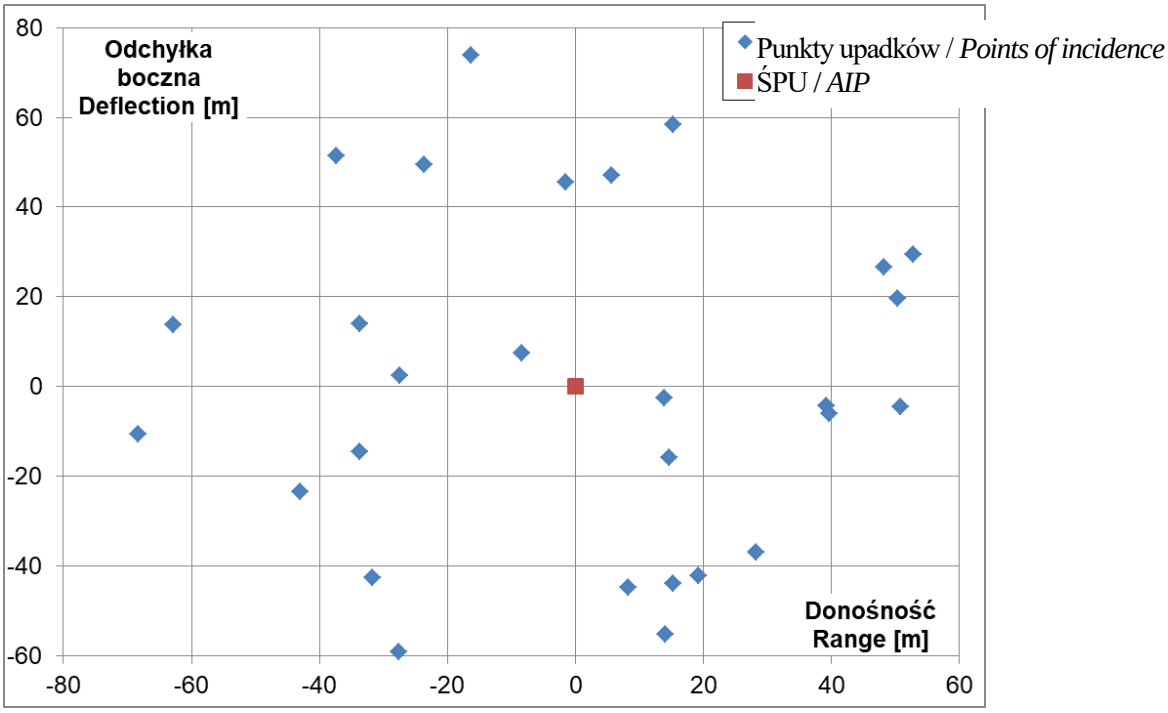
- warunki początkowe np. prędkość początkowa, kąt rzutu, prędkości kątowe pocisku;
- parametry pocisku np. właściwości gabarytowo-masowe, charakterystyki aerodynamiczne;
- parametry atmosfery np. wiatr, gęstość powietrza.

Ponieważ rozrzut punktów upadku podlega prawom statystycznym najczęściej do jego opisu wykorzystuje się właśnie metody statystyczne. Szeroka analiza tego aspektu przedstawiona jest w pracach [3] oraz [2]. Opis statystyczny rozkładu punktów upadku określa się często jako parametry skupienia pocisków. Parametry skupienia są dla wielu typów amunicji jednymi z kluczowych wymagań. W przypadku amunicji przeciwpancernej niekierowanej decydują o prawdopodobieństwie trafienia celu, zaś dla amunicji odłamkowo-burzącej mają istotny wpływ na liczbę amunicji potrzebnej do wykonania zadania ogniowego.

caused by differences of physical values affecting the trajectories and occurring between consecutive shots. It concerns above all:

- Initial conditions such as e.g. muzzle velocity, angle of projection, angular velocities of projectile;
- Projectile parameters such as e.g. dimension and mass parameters, aerodynamic characteristics;
- Atmospheric parameters, e.g. for wind and air density.

As the dispersion of impact points follows the laws of statistics then the process is usually described by the statistic methods. A wide analysis of this aspect is presented in publications [3] and [2]. A statistical description of impact points pattern is sometimes identified as the parameters of projectiles dispersion. Dispersion parameters belong to key specifications for many types of ammunition. In case of antitank unguided projectiles they decide about the probability of hitting, and in case of HE ammunition they are significant for numbers of rounds needed for execution of a firing task.



Rys. 1. Przykładowy rozkład punktów upadków

Fig. 1. Exemplary distribution for impact points

W Wojskowym Instytucie Technicznym Uzbrojenia opracowano naboje moździerzowe z pociskiem naddźwiękowym w ramach programu

Mortar cartridges with supersonic projectiles were developed in the Military Institute of Armament Technology in the frame

RAK AMUNICJA. W Założeniach Taktyczno-Technicznych programu RAK AMUNICJA [4] zawarte są wymagania dotyczące rozrzutu pocisków. Na rysunku 1 przedstawione jest zbiorcze ułożenie punktów upadków pocisków moździerzowych dla 28 strzałów wystrzelonych w czterech seriach. Dla wszystkich serii prędkość początkowa wynosiła $v_0 \approx 500$ m/s a kąt podniesienia lufy był stały mieszczący się w zakresie $\alpha = 45° \pm 10°$.

Otrzymane wyniki zapewniają spełnienie wymagań przedstawionych w Założeniach Taktyczno-Technicznych [4]. Jednakże przeprowadzenie analizy wpływu zaburzeń wybranych parametrów na rozrzut naddźwiękowych pocisków moździerzowych jest punktem wyjścia do dalszej poprawy tych parametrów oraz ma charakter poznawczy.

2. Analiza zaburzeń początkowych

Zaburzenia niektórych parametrów cechują się większym wpływem na donośność pocisków (np. prędkości początkowej czy kąta podniesienia lufy) a innych na odchyłkę boczną punktów upadków (np. wiatru poprzecznego). Dlatego w dalszej części pracy wprowadza się pojęcie rozrzutu w głąb (rozrzucie donośności) i wszerz (rozrzut odchyłki bocznej). Wpływ wielu parametrów jak i ich zaburzeń są dobrze opisane w pracach [1], [3], [5]. Jednakże opis ten nie pozwala na analizy ilościowe dla badanego pocisku. Ważną grupą czynników wpływających na lot pocisków są parametry atmosfery. Podczas tworzenia tabel strzelniczych analizowany jest wpływ najważniejszych zaburzeń atmosfery oraz zmiany masy pocisku na jego trajektorie. Poza opisanym w dalszej części artykułu podmuchem wiatru poprzecznego zaburzenia tych parametrów nie będą rozpatrywane. Analizowany będzie natomiast wpływ warunków początkowych na rozrzut pocisków. W celu uproszczenia rozważań, że wpływ powylotowego oddziaływania gazów prochowych jest nieznany i jako warunki początkowe uznaje się warunki po ustaniu powylotowego oddziaływania gazów prochowych na pocisk. Jednym z głównych zaburzeń warunków początkowych mających wpływ na rozrzut w głąb jest różnica prędkości początkowych pomiędzy pojedynczymi strzałami. Wynika ona ze zmiennego spalania się ładunku prochowego i analiza tego

of RAK MUNITIONS program. Requirements for the dispersion performance of projectiles are included in Tactical-technical Specifications for RAK MUNITIONS program [4]. The aggregated pattern of impact points for 28 mortar projectiles fired in four series in shown in Fig. 1. The muzzle velocity was $v_0 \approx 500$ m/s and the barrel elevation was in the range of $\alpha = 45° \pm 10°$ of each series.

Received results meet the requirements presented in the Tactical-Technical Specifications [4]. Anyway an analysis of an impact of disturbances of selected parameters into the dispersion of mortar supersonic projectiles still may be useful for further improvement of these parameters and for investigative purposes.

2. Analysis of Initial Disturbances

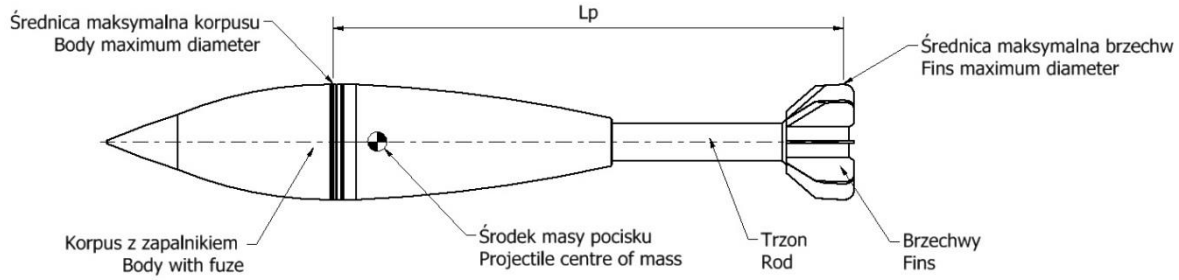
Deviations of some parameters have greater impact into the range of projectiles (e.g. the muzzle velocity or barrel elevation) whereas the other parameters affect more significantly the lateral deflection of incidence points (e.g. lateral wind). For this reason the notions of forward dispersion (dispersion of range) and lateral dispersion (dispersion of lateral deflection) are introduced later. Influence of many parameters and their deviations is well described in publications [1], [3], [5]. But this description cannot be used for quantitative analyses of investigated round. Parameters of atmosphere belong to important group of factors affecting the flight of projectiles. The influence of main atmospheric disturbances and a changing weight of the projectile into its trajectory is analysed at preparation of firing tables. Among these disturbances only the impact of a lateral gust of wind will be considered later. The impact of initial conditions on the dispersion of projectiles will be analysed instead. It was assumed for simplification of considerations that impact of powder gases leaving the barrel is unknown and the conditions existing after the action of these gases ceases are taken as the initial conditions. One of main disturbances of initial conditions which affect the forward scattering is a difference of muzzle velocities between particular shots. It is caused by the changes in combustion of powder

typu zjawisk zawiera się w zakresie balistyki wewnętrznej. Dla badanego pocisku wyniki symulacji wskazują, że zwiększenie prędkości wylotowej o 2 [m/s] zwiększy donośność o ok. 23 [m]. Ponieważ na rozrzut w głąb w znacznym stopniu wpływa zmiana parametru nie należącego do dziedziny balistyki zewnętrznej, zdecydowano się na analizowanie wyłącznie rozrzutu wszerz. Należy zatem wyodrębnić te parametry początkowe, które głównie wpływają na rozrzut wszerz.

Budowę klasycznego pocisku moździerzowego przedstawiono na rysunku 2. Jego prowadzenie w przewodzie lufy zapewnione jest przez dwa obszary styku pocisku z lufą. Pierwszy obszar znajduje się w miejscu największej średnicy korpusu a drugi w miejscu największej średnicy brzechw. Pierwszy będzie określany przednią częścią prowadzącą natomiast drugi tylną częścią prowadzącą. Odległość pomiędzy nimi to długość prowadzenia L_p.

charges which are studied by the internal ballistics. Results of simulations for the investigated projectile indicate that the increase of muzzle velocity by 2 [m/s] makes the range become greater by ca. 23 [m]. As the forward dispersion depends significantly on the parameter that is beyond the domain of external ballistics then a decision was made to analyse exclusively the lateral dispersion. Therefore, initial parameters which mainly affect the lateral dispersion have to be identified.

A design of a conventional mortar projectile is shown in Fig. 2. Its movement within the barrel is secured by two zones of contact between the projectile and the bore. The first zone is a place of the body greatest diameter and the second zone is in a place of the greatest diameter of fins. The first zone will be denoted as the front leading part whereas the second zone as the rear leading part. The distance between them is a leading distance L_p.



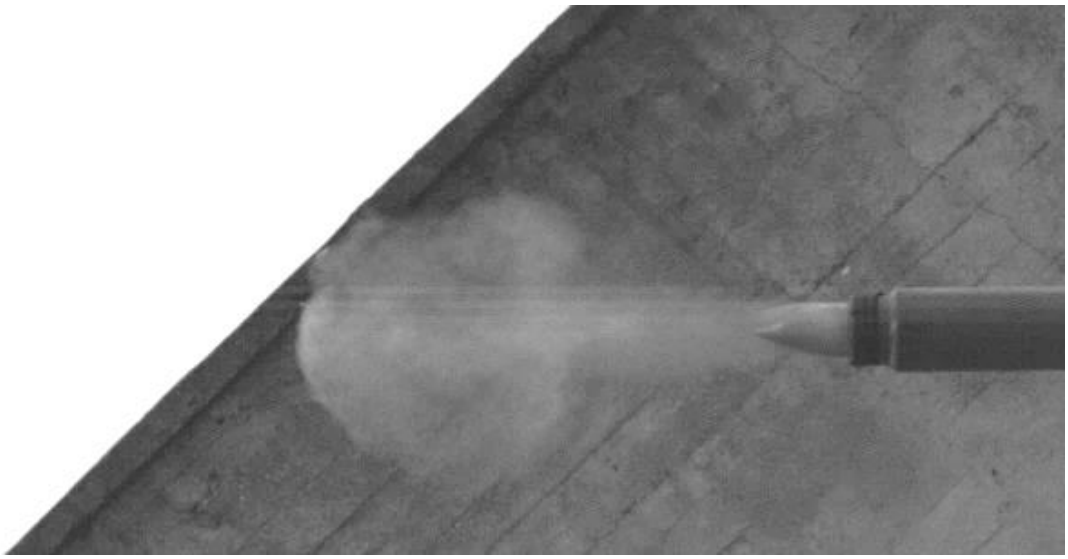
Rys. 2. Ogólna budowa klasycznego pocisku moździerzowego
Fig. 2. General design of a conventional mortar projectile

W celu wyznaczenia zaburzeń początkowych należy przeanalizować zachowanie się pocisku od jego ruchu w lufie do zakończenia powylotowego działania gazów prochowych. Szczegółowy wpływ powylotowego działania gazów prochowych na lot pocisku jest zjawiskiem skomplikowanym i jego szeroka analiza nie będzie częścią pracy. W opisywanym zakresie można rozróżnić trzy ważne fazy mające wpływ na wartości początkowe części parametrów. Faza pierwsza występuje podczas wychodzenia korpusu pocisku z przewodu lufy, gdy przednia część prowadząca znajduje się jeszcze wewnątrz przewodu lufy. Faza druga zachodzi, gdy przednia część prowadząca opuściła już przewód lufy, jednakże wewnątrz lufy znajduje się tylna część prowadząca. Ostatnia faza to powylotowe działanie gazów prochowych na

Behaviour of projectile, starting from its movement in the bore until the action of blowing powder gases is ended, has to be studied to determine the initial disturbances. A detailed analysis of the action of powder gases against the flight of the projectile is a complicated phenomenon and is not the subject of this paper. Three main phases, influencing the initial values of some parameters, may be distinguished in the described domain. The first phase takes place when the body of the projectile starts to leave the muzzle and the frontal leading part is still inside the bore. The second phase takes place when the frontal leading part has already left the bore but the rear leading part is still inside the bore. The last phase refers to action of blowing powder gases against the projectile. The pictures of the projectile

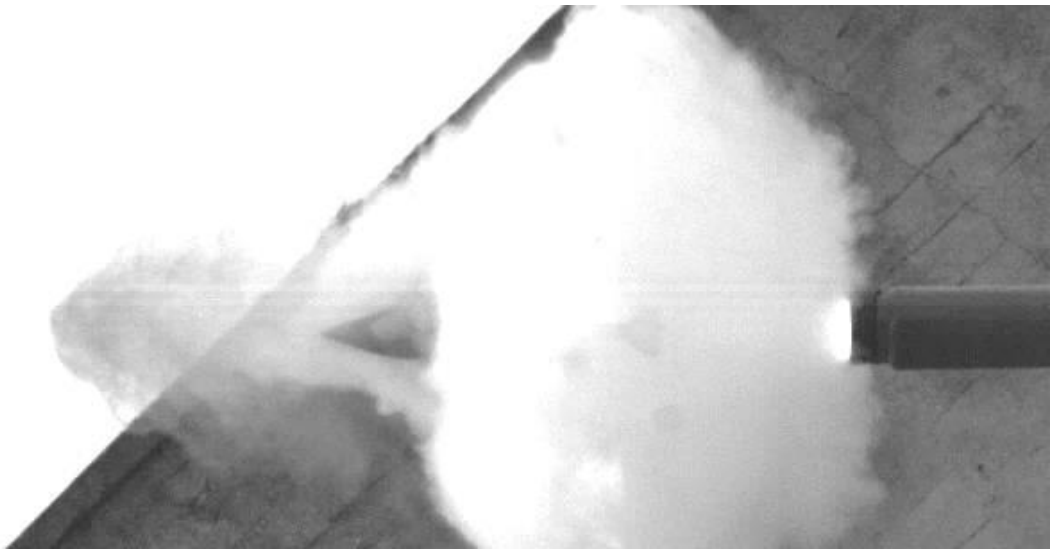
pocisk. Na rysunkach 3-5 przedstawiono zdjęcia pocisku w trakcie kolejnych faz. Podział na fazy pozwala prześledzić odmienne czynniki oddziałujące na pocisk w kolejności ich występowania i według ich typów.

during consecutive phases are shown in figures 3-5. Division into the phases is helpful at studying different factors acting against the projectile in accordance with the order and category of their action.



Rys. 3. Pocisk w trakcie pierwszej fazy
Fig. 3. Projectile during the first phase

Rys. 4. Pocisk w trakcie drugiej fazy
Fig. 4. Projectile during the second phase



Rys. 5. Pocisk w trakcie trzeciej fazy
Fig. 5. Projectile during the third phase

Pierwszą fazą (przedstawioną na rysunku 3) jest faza współpracy całego pocisku z przewodem lufy. Jako uproszczenie pominięty będzie wpływ gazów prochowych przedostających się pomiędzy lufą a pociskiem. Analiza współpracy pocisku i lufy w przypadku pocisku moździerzowego jest utrudniona względem typowych pocisków artyleryjskich. Przyczyną tego jest znacznie większy luz pomiędzy pociskiem a przewodem lufy. Dla pocisków moździerzowych różnica pomiędzy średnicą lufy a średnicą pocisku przeważnie zawiera się w zakresie od 0,3 a 0,6 mm [5]. Pozwala to na ruch poprzeczny pocisku lub jego obrót w przewodzie lufy mimo nieruchomej lufy. Jednocześnie, aby lufa mogła nadać jakąś prędkość poprzeczną lub obrotową pociskowi poprzez wzajemny kontakt, musi najpierw zniwelować ten luz. W pracy założono, że opisany luz nie wpływa na współpracę pocisku z lufą podczas nadawania prędkości normalnej V_{p1} oraz kątowej ω (na rysunku 6). W trakcie wychodzenia pocisku z lufy, lufa wykonuje ruch postępowy, obrotowy jak również posiada drgania własne. Dlatego w tej fazie pocisk poza prędkością postępową wzdłuż osi przewodu lufy, posiada również prędkość poprzeczną jak i obrotową wokół osi poprzecznej do swojej osi podłużnej. Po opuszczeniu przez przednią część prowadzącą przewodu lufy następuje przejście do fazy drugiej.

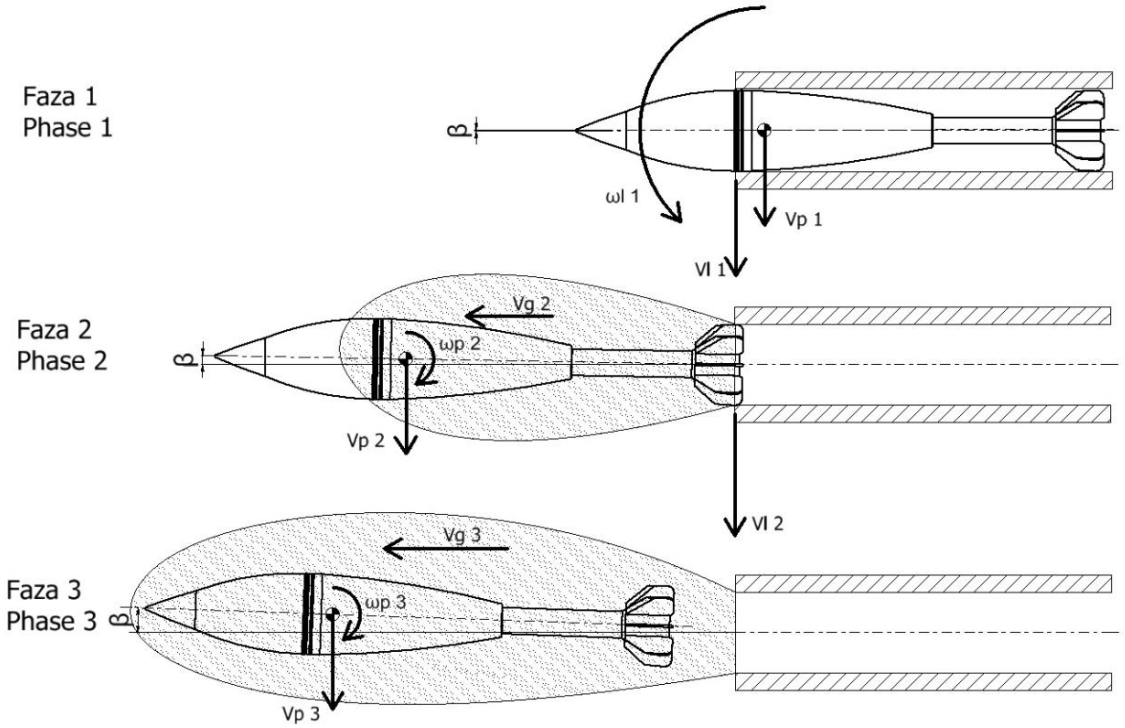
W czasie drugiej fazy (rysunek 4) tylna część prowadząca pocisku współpracuje z lufą natomiast jego korpus zaczyna być opływany

In the first phase (Fig. 3) the entire projectile works together with the barrel bore. The influence of gases leaking between the bore and projectile is neglected for simplicity reasons. The analysis of an interaction between the mortar projectile and the bore is more difficult than for typical gun shells. It is caused by a significantly greater clearance between the projectile and the wall of bore. Typical difference between the diameters of barrel and mortar projectiles is usually in the range from 0.3 to 0.6 mm [5]. It allows for a lateral movement or rotation of the projectile inside the bore despite a fixed barrel. When the barrel enforces any lateral or rotating velocity to the projectile due to direct contact this clearance is earlier removed. It is assumed in the paper that the above described clearance does not affect the interaction between the projectile and the bore when the normal V_{p1} and angular ω velocities are impelled (Fig. 6). The barrel is subjected to own vibration, rotation and advance displacements when the projectiles leaves the barrel. It means that during this phase the projectile, apart of the advance movement along the axis of bore, also has a lateral velocity and a rotating velocity against the axis perpendicular to its main axis. When the frontal leading part leaves the barrel, the second phase starts.

During the second phase (Fig. 4) the rear leading part of the projectile interacts with the bore whereas its body is overflown by powder

gazami prochowymi, o większej prędkości postępowej niż pocisk. Współpraca tylnej części prowadzącej z lufą również jest ograniczana luzem opisanym dla poprzedniej fazy. Jednakże ponieważ przednia część prowadząca jak i środek masy pocisku opuściły przewód lufy to pociskowi będzie nadana głównie prędkość kątową a w znikomym stopniu poprzeczną prędkość postępową. Jednocześnie nadawanie prędkości kątowej przez współpracę pocisk z przewodem lufy zależna będzie od różnicy poprzecznych prędkości przewodu lufy oraz środka masy pocisku. Drugim ważnym czynnikiem trudnym do analizy jest opływ korpusu przez gazy prochowe. Ponieważ istnieje wysokie prawdopodobieństwo, że pocisk położony jest niesymetrycznie względem osi przewodu lufy najprawdopodobniej opływ również będzie asymetryczny. Oznacza to, że wytworzy siłę i moment aerodynamiczny działający na korpus pocisku. Mogą zatem przyczynić się do wzrostu zaburzeń parametrów początkowych jakie występowały pod koniec pierwszej fazy lub je niwelować.

gases at greater than the projectile's advance velocity. The interaction of the rear leading part with the bore is also restricted by the clearance described in the previous phase. As the frontal leading part and the mass centre of the projectile have already left the bore then the projectile can mainly get an angular velocity and some insignificant portion of an advance movement in lateral direction. Then the impartation of the angular velocity through the interaction between the projectile and the bore depends upon the difference of lateral velocities for the barrel bore and projectile's mass centre. The overflow of projectile body by powder gases is a second important factor that is difficult to analyse. As it is highly possible that the projectile is set in unsymmetrical position against the bore axis then the overflow may be also of the same character. It means that it can produce an aerodynamic force and moment acting to the projectile's body. It may contribute to increasing or diminishing the disturbances of initial parameters existing at the end of the first phase.



Rys. 6. Schemat analizowanych faz wpływających na zaburzenia początkowe
Fig. 6. Schematic illustration of analysed phases influencing the initial disturbances

W czasie trzeciej fazy (rysunek 5) pocisk w czasie lotu swobodnego w dalszym ciągu

During the third phase (Fig. 5) the projectile moves freely and is overflowed by pow-

opływany jest gazami prochowymi o prędkości większej od niego. Zarówno rozkład prędkości jak i gęstości tych gazów jest niejednorodny co utrudnia analizę sił i momentów generowanych na korpusie pocisku przez ich opływ. Jednakże czas trwania tej fazy jest dłuższy względem wcześniejszych. Ogólny schemat analizowanych faz przedstawiony jest na rysunku 6.

3. Założenia do modelowania

Na podstawie przeprowadzonej wcześniej analizy należy założyć, że pociski na skutek zaburzeń początkowych będą posiadały losowe składowe prędkości poprzecznej do osi przewodu lufy, kąta nutacji oraz prędkości kątowej wokół jego środka masy. Ponieważ badany będzie wpływ zaburzeń początkowych na rozrzut wszerz to jako zaburzenia początkowe przyjęte będą: zadana prędkość normalna rzutowana na płaszczyznę poziomą, kąt odchylenia i prędkość kątowa odchylenia. Dla celów poznawczych uwzględniony będzie również wpływ nagłego podmuchu wiatru poprzecznego na początkowym odcinku toru lotu.

Przed modelowaniem należy dokonać analizy możliwych wartości zaburzeń początkowych. Ponieważ analiza powylotowego oddziaływania gazów prochowych wykracza poza zakres niniejszego artykułu oszacowanie wielkości zaburzeń początkowych zostanie wykonane dla fazy pierwszej i drugiej. Na podstawie analizy materiału filmowego, którego kadry zostały przedstawione na rysunkach od 3 do 5 przesunięcie końca lufy pomiędzy rysunkami 3 i 5 można oszacować na 1-2 mm natomiast odstęp czasu pomiędzy kadrami to ok. 0,005 sekundy. Oznacza to, że prędkość końca lufy osiąga ok. 0,2-0,4 m/s. Jednakże nieznana jest dokładna wartość prędkości lufy w momencie opuszczania przewodu lufy. Dlatego założone będą trzy przypadki:

- $V_{l1} = V_{l2} = 0{,}4$ m/s,
- $V_{l1} = 0$, $V_{l2} = 0{,}2$ m/s,
- $V_{l1} = 0$, $V_{l2} = 0{,}4$ m/s.

der gases with a greater velocity than its velocity. Distribution of both the velocities and the gas densities is not homogeneous and it is difficult to analyse the forces and moments exerted into the projectile's body due to the overflow. Anyway this phase lasts longer than the previous ones. General schematic of analysed phases is shown in Fig. 6.

3. Assumptions for Modelling

Basing on the analysis performed earlier an assumption may be taken that due to the initial disturbances the projectiles will get casual components of velocities in directions perpendicular to the bore axis, and of the total angle of attack, and of the angular velocity against its mass centre. As the influence of initial disturbances on the lateral dispersion is investigated then following initial disturbances are specified: given normal velocity projected on the horizontal plane, yaw angle, and angular velocity of yaw. Moreover the impact of a sudden gust of lateral wind at the beginning of flying path will be considered for investigative reasons.

An analysis of possible values of initial disturbances has to be made before the modelling procedure. As the analysis of action of outflowing powder gases is beyond the scope of the present paper then the estimation of initial disturbances will be made for the first and second phases. Basing on the analysis of film sequence and pictures presented on figures 3-5, the displacement of the barrel muzzle may be estimated as 1-2 mm at the time gap between the pictures of ca. 0.005 s. It means that the velocity of barrel muzzle is ca. 0.2-0.4 m/s. But the accurate value of barrel velocity at leaving the bore is unknown. For this reason three cases are considered:

- $V_{l1} = V_{l2} = 0.4$ m/s,
- $V_{l1} = 0$, $V_{l2} = 0.2$ m/s,
- $V_{l1} = 0$, $V_{l2} = 0.4$ m/s.

Dla pierwszego przypadku przy opisanych wcześniej założeniach, prędkość poprzeczna pocisku wyniesie $V_{p1} = V_{p2} = 0{,}4$ m/s. Kąt odchylenia pocisku jest zależny od luzu pomiędzy pociskiem a ścianką lufy i dla $L_p \approx 0{,}53$ m wyniesie $\beta_1 \approx 0{,}05°$. Ponieważ $V_{p2}=V_{l2}$ to $\omega_{p2} = 0$. W drugim przypadku $V_{p2}=0$, natomiast $\beta_2 \approx 0{,}21°$ a $\omega_{p2} \approx 8°/s$. Dla trzeciego $V_{p2}=0$, natomiast $\beta_2 \approx 0{,}42°$ a $\omega_{p2} \approx 16°/s$. W przypadku prędkości wiatru założono, że słaby podmuch ma prędkość 1 m/s a silny 10 m/s. Postanowiono również przeanalizować zaburzenia o wartościach mniejszych i pośrednich. Wartości uwzględnianych zaburzeń początkowych w pierwszym etapie przedstawione są w tabeli 1.

In the first case the lateral velocity of the projectile is $V_{p1} = V_{p2} = 0.4$ m/s at earlier described assumptions. Angle of projectile deviation depends on clearance between projectile and wall of bore and equals to $\beta_1 \approx 0.05°$ for $L_p \approx 0.53$ m. Because $V_{p2}=V_{l2}$ then $\omega_{p2} = 0$. In the second case $V_{p2}=0$, whereas $\beta_2 \approx 0.21°$ and $\omega_{p2} \approx 8.0°/s$. In the third case $V_{p2}=0$, whereas $\beta_2 \approx 0.42°$ and $\omega_{p2} \approx 16°/s$. For wind velocities it was assumed that a weak blow has a velocity of 1.0 m/s and a strong gust of 10.0 m/s. It was also decided to analyse disturbances having lower and intermediate values. Considered values of initial disturbances for the first stage are shown in table 1.

Tabela 1. Analizowane wartości zaburzeń początkowych
Table 1. Analysed values of initial disturbances

		Wartość / *Value*					
Zaburzenie / *Disturbance*	Prędkość poprzeczna [m/s] *Lateral velocity*	0,2			0,4		
	Kąt odchylenia β [°] *Angle of yaw*	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
	Prędkość kątowa odchylenia ω_{p2} [°/s] *Angular velocity of yaw*	2	4	6	8	12	16
	Podmuch wiatru [m/s] *Gust of wind*	1	2	4	6	8	10

Do analiz wykorzystano model traktujący pocisk jako bryłę sztywną, opisany w pracy [6]. Ponieważ efekt Coriolisa może nadawać pociskowi pewną odchyłkę boczną, w związku z tym aby wyniki nie posiadały dodatkowych zmiennych wpływ efektu Coriolisa został w modelu pominięty. Poza modelowaniem wpływu podmuchu wiatru bocznego atmosfera w modelu będzie nieruchoma. Podmuch wiatru bocznego będzie zamodelowany jako wiatr wiejący poprzecznie do wektora prędkości pocisku przez 0,3 sekundy. Po tym czasie dla dalszej części obliczeń atmosfera będzie nieruchoma. Charakterystyki aerodynamiczne oraz gabarytowo-masowe pocisku przyjęto jak dla pocisku, którego rozrzut przedstawiony był na rysunku 1. Obliczenia prowadzono dla prędkości początkowej wynoszącej 500 m/s oraz kącie podniesienia 45°. W pracach [4] oraz [7] prowadzono analizy podrzutu aerodynamicznego (ang. aerodynamic jump) na rozrzut pocisku. Równanie to przy założeniu braku prędkości obrotowej pocisku wokół jego osi podłużnej ma postać [4]:

The projectile was modelled in the analysis by a rigid body presented in [6]. The Coriolis effect may generate a lateral deflection and for this reason, in order to avoid additional variables in the results, the influence of Coriolis effect was neglected in the model. Apart from modelling the impact of the side wind the atmosphere is unmovable. The blow of the side wind will be modelled as the wind blowing within 0.3 s in crosswise direction to the projectile velocity vector. After this time for further calculations the atmosphere is unmovable. The same aerodynamic and overall size-weight characteristics of projectile were taken as for the projectile for which the scattering is presented in Fig. 1. The calculations were carried out for the muzzle velocity 500 m/s at angle of elevation 45°. Publications [4] and [7] deal with the influence of the aerodynamic jump into projectile's scattering. If the projectile does not rotate around its main axis then this equation has the form [4]:

$$J_A = \frac{I_y}{m}\left(\frac{Cy}{C_m}\right)(-\omega) \quad (1)$$

gdzie: J_A – tangens kąta, I_y – moment bezwładności pocisku względem osi poprzecznej, m – masa pocisku, Cy – współczynnik siły nośnej, C_m – współczynnik momentu stabilizującego, ω – prędkość kątowa odchylenia

Wartość otrzymana ze wzoru (1) jest tangensem kąta pomiędzy rzutami na płaszczyznę poziomą wektora prędkości początkowej i osią łączącą punkty początkowy i końcowy trajektorii. W przypadku analizowanego pocisku dla prędkości początkowej pocisku wynoszącej v_0≈500 m/s, w ciągu pierwszej sekundy lotu współczynnik momentu stabilizującego zmienia się o ponad 200% a w ciągu pierwszych trzech sekund lotu o ponad 400%. W związku z tym trudno wyznaczyć współczynnik momentu stabilizującego, który należy podstawić do wzoru. W dalszej części pracy przedstawiono porównanie wyników otrzymanych ze wzoru (1) i wyznaczonych z modelowania. Porównanie to będzie miało charakter oceny dokładności wzoru (1).

4. Wyniki modelowania

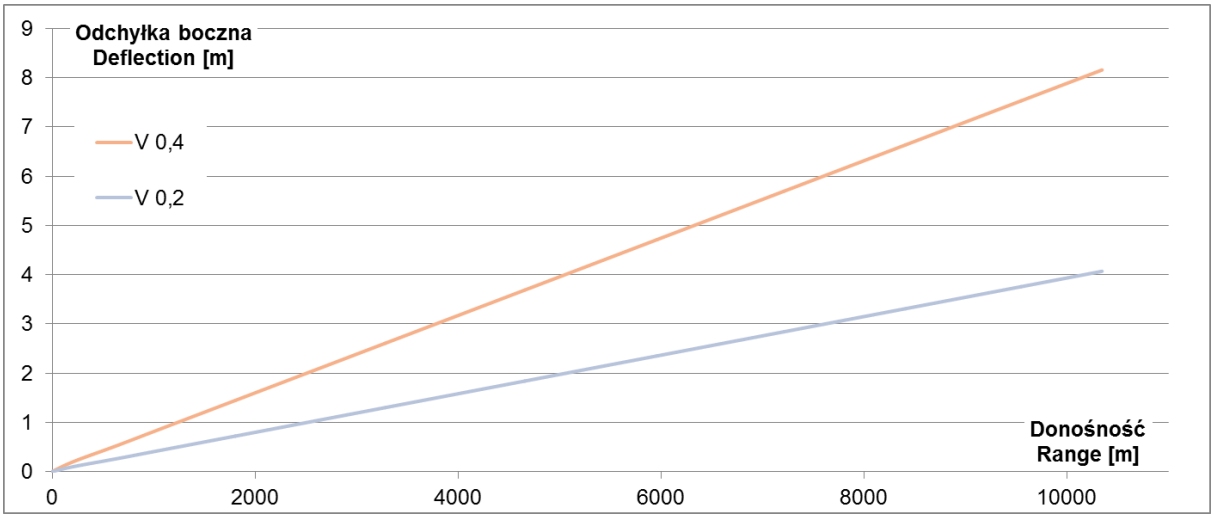
Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono wpływ prędkości poprzecznej na odchyłkę boczną dla całej trajektorii oraz jej pierwszych 1000 metrów.

Where: J_A – tangent of the angle, I_y – projectile's moment of inertia against lateral axis, m – weight of projectile, Cy – coefficient of lifting force, C_m – coefficient of the stabilising moment, ω – angular velocity of deviation

The value received from relation (1) is the tangent of an angle created by the projection of the muzzle velocity vector into the horizontal plane and by the axis connecting the initial and terminal points of trajectory. As the muzzle velocity of the considered projectile is v_0≈500 m/s then the coefficient of stabilising moment changes more than 200% within the first second of flight and more than 400% during the first three seconds. For this reason it is difficult to identify the coefficient of stabilising moment that could be put into the relation. A comparison of results received from the relation (1) and established by the modelling is presented later in the paper. The comparison is used to evaluate the accuracy of relation (1).

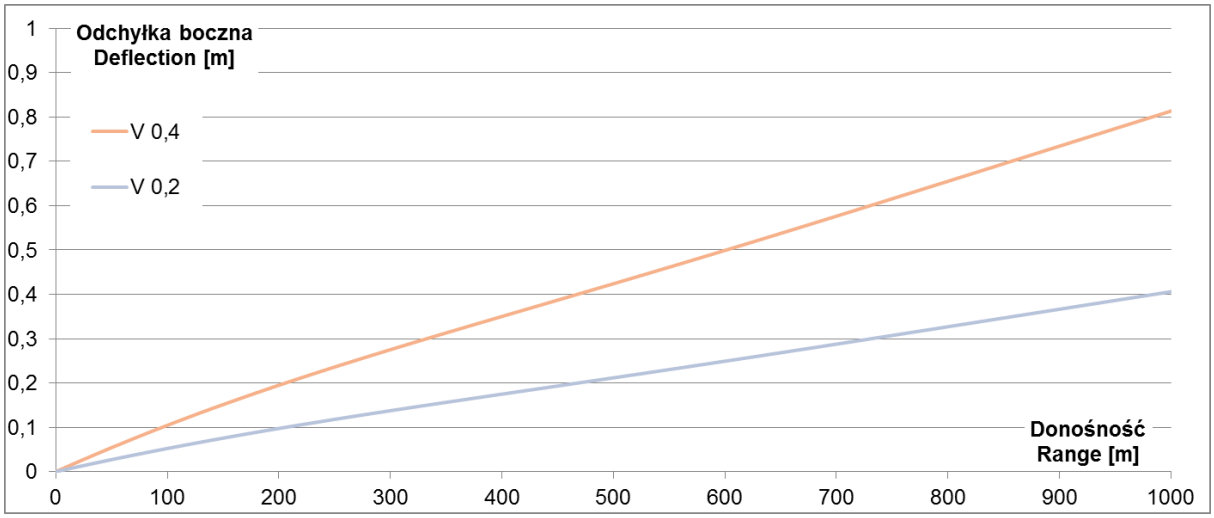
4. Results of Modelling

The influence of the lateral velocity into the lateral deflection for the whole trajectory and the initial 1000 m is shown in figures 7 and 8.



Rys. 7. Wpływ prędkości poprzecznej na odchyłkę boczną

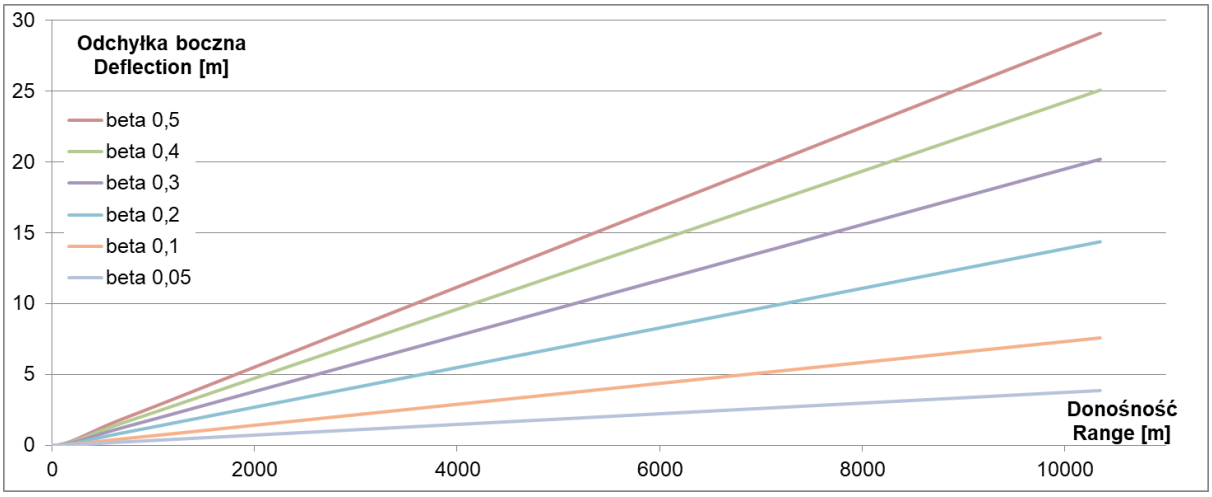
Fig. 7. Influence of lateral velocity into the lateral deflection



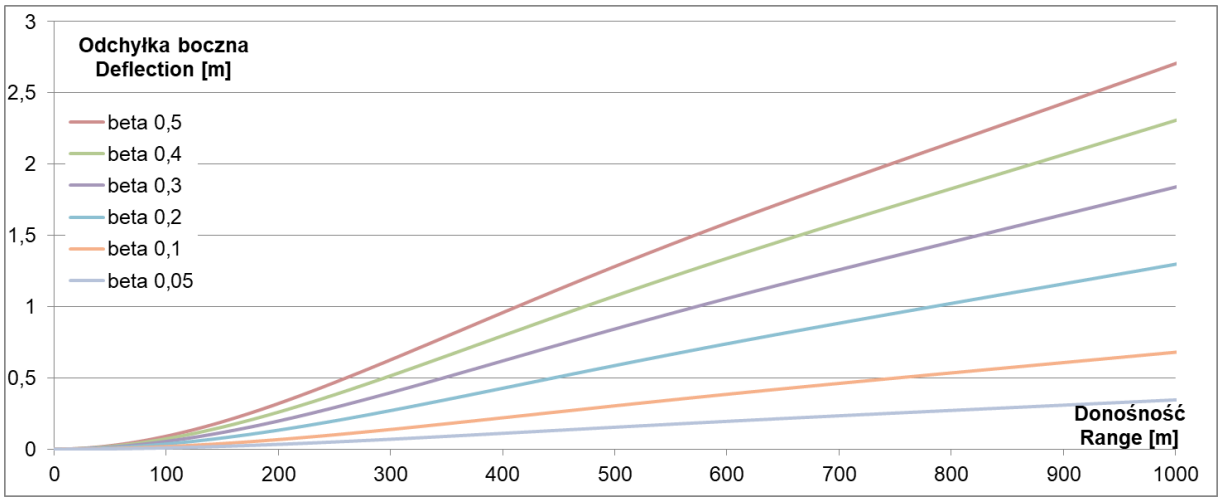
Rys. 8. Wpływ prędkości poprzecznej na odchyłkę boczną na początku trajektorii
Fig. 8. Influence of lateral velocity into the lateral deflection at the initial trajectory

Na rysunkach 9 i 10 przedstawiono wpływ kąta odchylenia na odchyłkę boczną dla całej trajektorii oraz jej pierwszego 1000 metrów.

Influence of the yaw angle into the lateral deflection for the whole trajectory and the initial 1000 m is shown in Fig. 9 and 10.



Rys. 9. Wpływ kąta odchylenia na odchyłkę boczną
Rys. 9. Influence of initial yaw angle into the lateral deflection

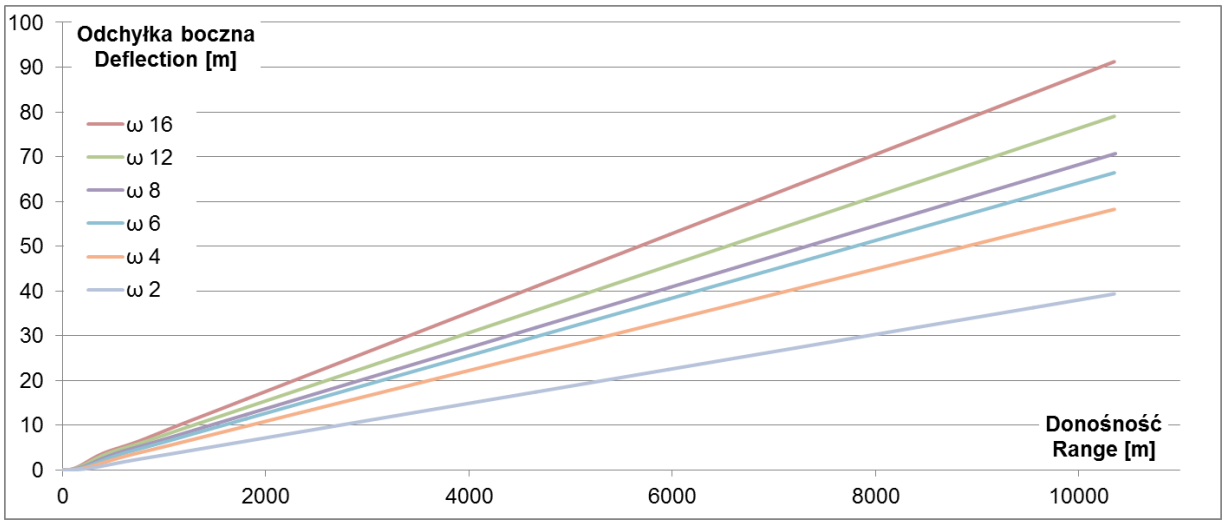


Rys. 10. Wpływ kąta odchylenia na odchyłkę boczną na początku trajektorii

Fig. 10. Influence of the deviation angle into the at the initial trajectory

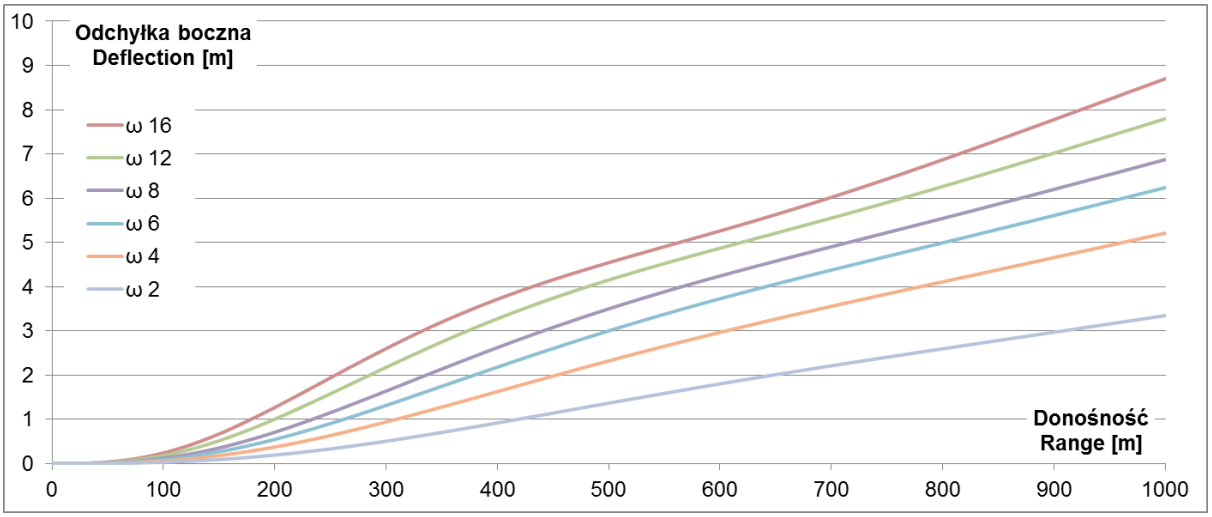
Na rysunkach 11 i 12 przedstawiono wpływ prędkości kątowej odchylenia na odchyłkę boczną dla całej trajektorii oraz jej pierwszego 1000 metrów.

The influence of the yaw angular velocity into the lateral deflection for the whole trajectory and the initial 1000 m is shown in figures 11 and 12.

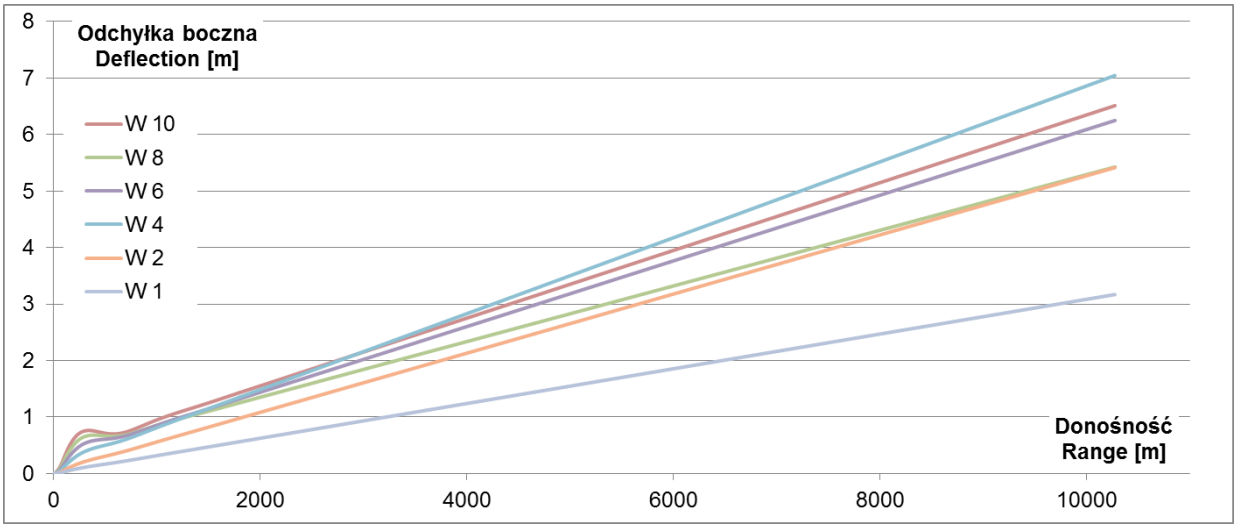


Rys. 11. Wpływ prędkości kątowej odchylenia na odchyłkę boczną

Fig. 11. Influence of the yaw angle velocity into the lateral deflection



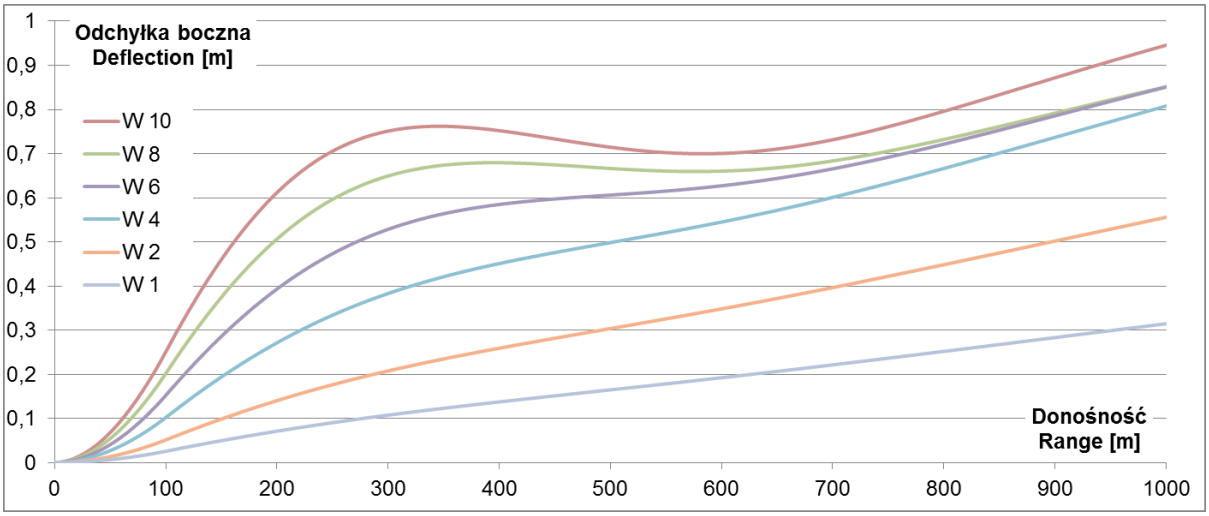
Rys. 12. Wpływ prędkości kątowej odchylenia na odchyłkę boczną na początku trajektorii
Fig. 12. Influence of the yaw angle velocity into the lateral deflection at the initial trajectory



Rys. 13. Wpływ podmuchu wiatru bocznego na odchyłkę boczną
Fig. 13. Influence of a side wind gust into the lateral deflection

Na rysunkach 13 i 14 przedstawiono wpływ podmuchu wiatru bocznego na odchyłkę boczną dla całej trajektorii oraz jej pierwszych 1000 metrów.

The influence of a side wind gust into the lateral deflection for the whole trajectory and the initial 1000 m is shown in figures 13 and 14.



Rys. 14. Wpływ podmuchu wiatru bocznego na odchyłkę boczną na początku trajektorii
Fig. 14. Influence of a side wind gust into the lateral deflection at the initial trajectory

5. Analiza wyników

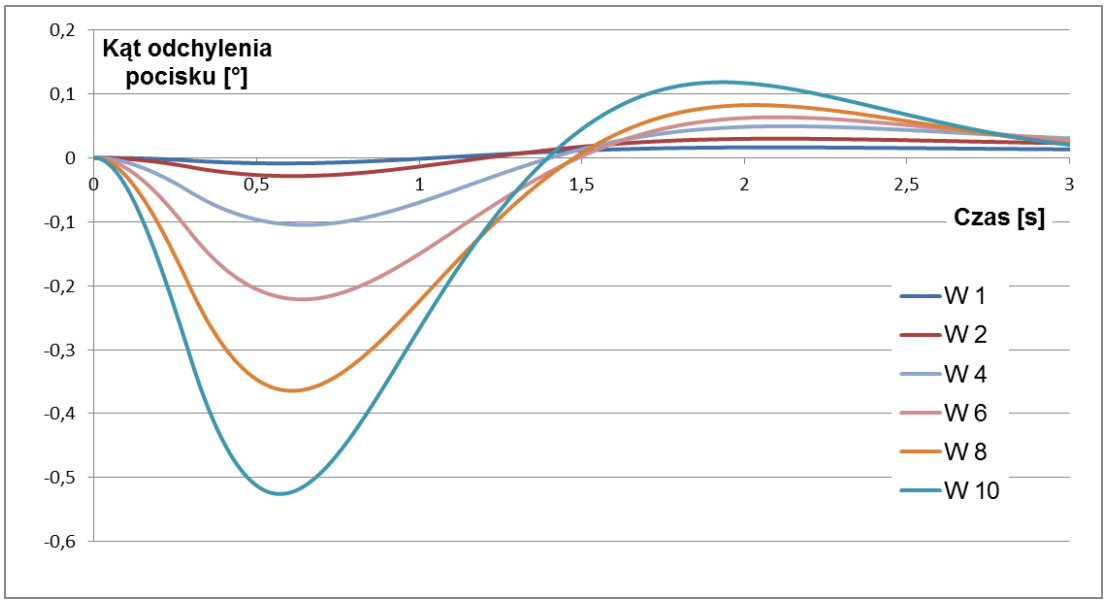
Z analizowanych zaburzeń początkowych największy wpływ na odchyłkę boczną ma początkowa prędkość kątowa odchylenia. Zależność otrzymanych wartości odchyłki bocznej od wartości prędkości kątowej odchylenia jest nieliniowa. Odchyłka boczna otrzymana dla prędkości kątowej rzędu 2°/s jest dwa razy mniejsza niż dla 12°/s. Głównymi czynnikami wywołującymi tę nieliniowość są: moment tłumiący prędkość obrotową wokół osi poprzecznej, który rośnie wraz ze wzrostem wartości tego wymuszenia oraz moment stabilizujący rosnący wraz z kątem nutacji. Nawet niewielkie wymuszenia prędkości kątowej w znacznym stopniu wpływają na rozrzut, gdyż dla prędkości kątowej 2°/s wartość odchyłki bocznej wyniosła ok. 40 m. Jednocześnie dla prędkości kątowej 16°/s otrzymana odchyłka boczna jest większa niż dla serii strzałów przedstawionej na rysunku 1. Drugim z analizowanych parametrów początkowych, którego zaburzenia mają duży wpływ na rozrzut jest początkowy kąt odchylenia. Dla kąta odchylenia 0,5° otrzymano odchyłkę boczną 29 m. Wpływ wartości kąta odchylenia na wartość odchyłki bocznej również jest nieliniowy, lecz w znacznie mniejszym stopniu niż dla prędkości kątowej odchylenia. Największa nieliniowość występuje natomiast dla wpływu podmuchu wiatru na odchyłkę boczną. Z badanych wartości największa odchyłka wystąpiła podmuchu o prędkości 4

5. Analysis of Results

The initial angular velocity of deviation has the greatest impact into the lateral deflection among the considered initial disturbances. Dependence of received values of lateral deflection on the values of deviation angular velocity is not linear. The lateral deflection received for angular velocity of ca. 2°/s is two times lower than for 12°/s. A pitch damping moment increasing with the enforcement, and a stabilising moment increasing with the angle of nutation, are the main reasons of nonlinearity. Even small enforcements of angular velocity cause significant deflection as for the angular velocity of 2°/s the value of lateral deflection was ca. 40 m. Anyway for angular velocity of 16°/s the received lateral deflection is greater than for the series of shots presented in Fig. 1. Disturbances of the initial angle of deviation, which is the second analysed initial parameter, have a great impact into the dispersion. For the deviation angle of 0.5° the lateral deflection of 29 m was received. The influence of the yaw angle into the values of lateral deflection is also nonlinear, but in significantly lower degree than for the angular velocity of yaw. The greatest nonlinearity occurs at the influence of a wind gust into the lateral deflection. Among the considered values the gust with velocity of 4 m/s produces the greatest deflection. For greater velocities the received

m/s. Dla większych wartości prędkości otrzymana odchyłka była mniejsza. Jest to spowodowane tym, że wiatr boczny poza nadawaniem prędkości poprzecznej powoduje obrót pocisku wierzchołkiem w stronę skąd wieje wiatr i po ustaniu podmuchu wiatru na powierzchni pocisku wytwarzana jest siła normalna skierowana przeciwnie do kierunku wiatru. Zmiana kąta odchylenia pocisku w czasie została przedstawiona na rysunku 15.

deflection was smaller. The reason is that the lateral wind, apart from imparting the lateral velocity, also rotates the top of the projectile in opposite direction to the direction of the wind blow and after the blowing stops a normal force is generated in direction opposite to the wind. Changes of projectile deviation angle against the time are shown in Fig. 15.



Rys. 15. Zmiana kąta odchylenia pocisku przy podmuchu wiatru poprzecznego
Fig. 15. Change of the the projectile yaw angle at a lateral gust of wind
Kąt odchylenia pocisku – *Projectile yaw angle*, Czas - *Time*

Wartości przestawione na rysunku 15 wskazują, że maksymalny kąt odchylenia pocisku osiągany w wyniku oddziaływania wiatru jest porównywalny z tym jaki był uwzględniany we wcześniejszym modelowaniu. Natomiast badany wpływ prędkości poprzecznej jest porównywalny do badanego wpływu porywu wiatru poprzecznego. Jest to spowodowane tym, że modelowano wartości prędkości poprzecznej nie przekraczające jednego promila wartości prędkości postępowej.

Dla wzoru (1) przedstawiony był problem doboru właściwego współczynnika C_m do podstawienia, z racji dużej dynamiki jego zmian dla tego zakresu liczb Macha. W związku z tym we wzorze (1) tak dobierano wartości współczynnika C_m aby osiągnąć wyniki zgodne z wcześniej przedstawionym modelowaniem. Wyniki przedstawiono w tabeli 2.

Values presented in Fig. 15 indicate that a maximal angle of projectile deviation produced by the action of the wind is comparable with the angle considered at the earlier modelling. The investigated impact of the lateral velocity is compared with the considered impact of the lateral wind gust. It is caused by the fact that the modelled values of the initial lateral velocity were smaller than one per mile of value for the advancing velocity.

A question of substitution of a suitable C_m coefficient into the relation (1) was presented earlier because of its high dynamics of changes for the considered range of Mach numbers. For this reason the values of C_m coefficient in the relation (1) were so matched to get the results complying with the earlier presented modelling. The results are presented in Table 2.

Tabela 2. Wartości współczynnika momentu stabilizującego użyte we wzorze (1)
Table 2. Values of coefficients for the stabilising moment used in relation (1)

Prędkość kątowa odchylenia ω [°/s] *Angular velocity of deviation*	2	4	6	8	12	16
C_m	0,00957	0,0129	0,017	0,0213	0,0285	0,033

Wyniki wskazują na znaczne różnice w wartości współczynnika C_m, które należy podstawić do wzoru (1), aby dopasować otrzymane wyniki do wyników modelowania dla całego badanego zakresu prędkości kątowych odchylenia. Jest to związane głównie tym, że wzór (1) opisuje zjawisko liniowo natomiast wyniki z modelowania wskazują na dużą nieliniowość zjawiska. W związku z tym ten wzór należy uznać przynajmniej dla tego typu pocisku jako mało dokładny.

Drugim etapem analizy będzie sprawdzenie wpływu połączonych zaburzeń zgodnie z analizowanymi wcześniej przypadkami. Porównanie opisanych wcześniej trzech przypadków przedstawione jest na rysunku 16.

Otrzymane wartości wskazują, że wartości odchyłek bocznych dla przypadków 1 oraz 2 mieszczą się w zakresie wyników otrzymanych eksperymentalnie przedstawionych na rysunku 1. Oznacza to, że wartości zaburzeń dla przypadku 3 mogą być przeszacowane choć zgodne z rozkładem statystycznym. Jednocześnie łączna odchyłka boczna jest mniejsza niż suma analogicznych dwóch odchyleń liczonych niezależnie.

6. Wnioski

Przeprowadzona analiza wskazuje, że dla badanego naddźwiękowego pocisku moździerzowego największy wpływ na rozrzut wszerz ma prędkość kątowa odchylenia. Jednocześnie jej wpływ jest nieliniowy względem wartości tej prędkości. Głównym czynnikiem mającym wpływ na tą nieliniowość jest tłumienie prędkości kątowej pocisku. Drugim czynnikiem mającym silny wpływ na rozrzut wszerz jest początkowy kąt odchylenia pocisków. Dla tego czynnika nieliniowość jest znacznie mniejsza. Dla analizowanych wartości prędkości normalnych (max. 0,4 m/s) ich wpływ na od-

The results indicate that the values of C_m coefficient, which have to be substituted into the relation (1) to match the received results with the results of modelling within the whole range of considered velocities of angular deviation, vary significantly. It is caused in general by the fact that the relation (1) describes the phenomenon in a linear way whereas the results of modelling indicate its great nonlinearity. For this reason this relation has to be considered at least as inaccurate.

The second stage of the analysis examines an influence of combined disturbances in accordance with earlier analysed cases. The comparison of three cases which were described earlier is presented in Fig. 16.

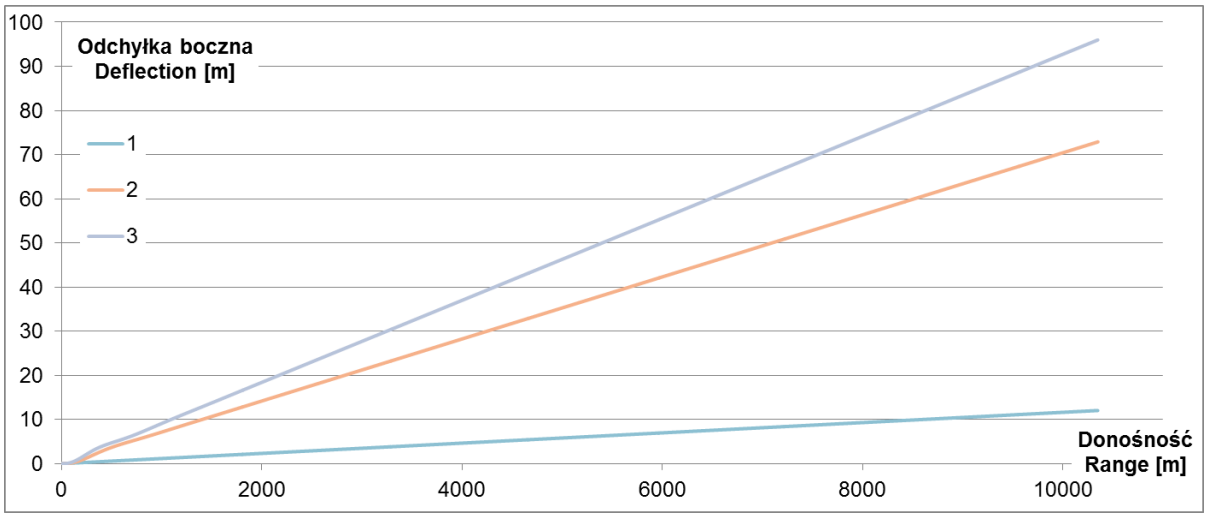
The received results show that the values of lateral deflections for cases 1 and 2 are within the interwall of results received in experiments and presented in Fig. 1. It means that the values of disturbances for the case 3 may be overestimated even if they still comply with the statistical distribution. Moreover the aggregated lateral deflection is lower than the sum of two identical deflections calculated independently.

6. Conclusions

Performed analysis indicates that the angular velocity of yaw has the greatest impact into the lateral deflection of the supersonic mortar projectile. Moreover the action of this velocity has a nonlinear character in relation to its value. Suppression of the projectile angular velocity is a main factor causing this nonlinearity. The second factor which has a significant influence into the lateral dispersion is the initial yaw angle. This factor shows significantly lower degree of nonlinearity. For the analysed values of normal velocities (max. 0.4 m/s) they affect the lateral deflection by more

chyłkę boczną jest ponad dziesięciokrotnie mniejszy niż wpływ największej badanej prędkości kątowej odchylenia. Również krótkotrwały podmuch wiatru oddziałujący w początkowym okresie lotu nie wpływa znacząco na rozrzut pocisku. Stwierdzono (przy uwzględnieniu opisanych założeń), że ruch lufy w kierunku poprzecznym podczas wychodzenia pocisku z lufy o 1 mm może wywołać odchyłkę boczną o wartości ponad 70 m.

than ten times less degree than observed for the greatest analysed angular velocity of yaw. Also a short lasting gust of wind at the initial part of trajectory does not influence largely the dispersion of the projectile. It was stated (by considering the described assumptions) that a crosswise displacement of the barrel by 1 mm in the moment when the projectile leaves the barrel may produce a lateral deflection of more than 70 m.



Rys. 16. Odchyłki boczne dla analizowanych przypadków
Fig. 16. Lateral deflections for analysed cases

Zaburzenia początkowe są losowe i mogą mieć wartości mniejsze niż dla przypadku 1. Zarówno same wartości tych zaburzeń jak i ich rozkład statystyczny powinny być poddane badaniu eksperymentalnemu. W czasie wystrzału może również wystąpić nakładanie się wzajemnie przeciwstawnych co do wpływu na odchyłkę boczną zaburzeń (np. prędkości poprzecznej i prędkości kątowej odchylenia). Kolejnym aspektem wymagającym głębszej analizy jest wpływ powylotowego oddziaływania gazów prochowych na badane w pracy parametry początkowe. Dopiero analiza wszystkich tych zjawisk pozwoli na dokładne określenie czynników mających wpływ na rozrzut badanych pocisków. Zastosowanie wzoru (1) na wyznaczenie podrzutu aerodynamicznego (ang. aerodynamic jump) dla opisanego pocisku i warunków początkowych jest niecelowe ze względu na duże różnice wartości współczynnika C_m koniecznego do podstawienia, aby otrzymane wyniki były zbliżone do wyników modelowania. Stwierdzono również, że większość zaburzeń oddziałuje

Initial disturbances are casual and their values may be lower than for the 1-st case. Both the mere values of the disturbances and their statistical distribution have to be subjected to experimental investigations. The disturbances generating lateral deflection at-firing may also counteract to each other (e.g. lateral velocity and angular velocity of yaw). Influence of blowing powder gases into the initial parameters considered in the paper is a next aspect which has to be closer analysed. Only the analysis of all these effects can define precisely the factors influencing the dispersion of investigated projectiles. Any application of the relation (1) for determination of the aerodynamic jump for the described projectile and initial conditions is not reasonable as there are great differences in values of C_m coefficient, that has to be substituted to get the results which could comply with the results of modelling. It was also stated that most of disturbances affect the values of the lateral deflection in a non-

na wartość odchyłki bocznej w sposób nieliniowy oraz wartość odchyłki bocznej liczonej dla wypadkowej kilku zaburzeń jest różna od wartości sumy odchyłek bocznych dla zaburzeń liczonych niezależnie.

linear way, and the value of lateral deflection calculated as a resultant of a few disturbances differs from the value of aggregated later lateral deflections al declinations calculated for individual disturbances.

Literatura / *Literature*

[1] Józef Gacek, Balistyka zewnętrzna Część I. Modelowanie zjawisk balistyki zewnętrznej i dynamiki lotu, Warszawa: Wydawnictwo WAT, 1999.

[2] J. Stołboszyński, Podręcznik Artylerii Tom VII, Warszawa: Wydawnictwo Ministerstwa Ob.-rony Narodowej, 1956.

[3] Józef Gacek, Balistyka zewnętrzna część II. Analiza dynamicznych właściwości obiektów w locie., Warszawa: Wydawnictwo WAT, 1999.

[4] INSPEKTORAT UZBROJENIA, „ZAŁOŻENIA TAKTYCZNO-TECHNICZNE na opracowanie naboi z pociskiem odłamkowo-burzącym, dymnym i oświetlającym do 120 mm moździerza RAK," Warszawa, 2014.

[5] R. L. McCoy, Modern External Ballistics, Atglen: Schiffer Publishing Ltd., 1999.

[6] P. N. A. A. G. S. T. S. ARTILLERY, AEP-35 TECHNICAL DATA FOR THE DETERMINATION OF INTERCHANGEABILITY OF COMPONENTS OF ARTILLERY AND MORTAR SYSTEMS Edition 2, 2002.

[7] Mariusz Magier i Tomasz Merda, „ZMODYFIKOWANY MODEL BALISTYKI ZEWNĘTRZNEJ DLA NADDŹWIĘKOWYCH POCISKÓW MOŹDZIERZOWYCH," *Problemy Techniki Uzbrojenia*, tom nr 4, nr ISSN 1230, 2017.

[8] S. G. Floroff i B. L. Salatino, „120 mm Ammunition Feasibility Assesment For Light Artillery, Technical Report," U.S. ARMY ARMAMENT RESEARCH, DEVELOPMENT AND ENGINEERING CENTER, 2000.