

**KOMUNIKATY METEOROLOGICZNE DLA ARTYLERII
PRZECIWLOTNICZEJ*****METEOROLOGICAL MESSAGES FOR ANTI-AIRCRAFT
ARTILLERY***

Leszek BARANOWSKI

Wydział Mechatroniki i Lotnictwa, Wojskowa Akademia Techniczna
Faculty of Mechatronics and Aviation at the Military University of Technology

Michał CHILIŃSKI

Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski
Faculty of Physics at the Warsaw's University

Błażej GADOMSKI

PIT-RADWAR S.A.

Janusz JASIŃSKI

Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji, Wojskowa Akademia Techniczna
Faculty of Land Engineering and Geodesy at the Military University of Technology

DOI 10.5604/01.3001.0010.0273

Streszczenie: Wpływ warunków meteorologicznych na tor lotu pocisku jest tematem rozważań naukowych przynajmniej od początku poprzedniego wieku. W tym czasie powstały różne standardy oraz metody uwzględniania zmian warunków meteorologicznych przy wyznaczaniu nastaw działowych. W artykule zaprezentowano kilka najbardziej rozpowszechnionych metod. Dodatkowo przedstawiono rezultaty ich zastosowania na przykładzie armaty przeciwlotniczej KDA 35 mm.

Słowa kluczowe: METCM, METB, meteośredni, meteo-11, komunikaty meteorologiczne

1. Wstęp

Problem wyznaczenia nastaw działowych zapewniających trafienie pocisku w określony punkt w przestrzeni w określonym czasie jest, obok śledzenia celu, najważniejszym zagadnieniem związanym z kierowaniem ogniem. Warunki atmosferyczne oraz ich zmienność utrudniają to zadanie. Próby uwzględniania tej zmienności sięgają przełomu XIX i XX wieku [1]. Na przestrzeni lat powstało kilka koncepcji i standardów dostarczania informacji o warunkach meteorologicznych jak również

Abstract: Impact of meteorological conditions on projectile trajectory has been subjected to scientific research since the beginning of 20th century. During this time different standards and methods of taking meteorological conditions into account in calculations of firing angles were established. This paper presents a number of widely used methods and the results of their application basing on an example of KDA 35 mm antiaircraft gun.

Keywords: METCM, METB, meteo-average, METEO-11, meteo messages

1. Introduction

Question of target tracking and calculating gun settings which provide accurate hitting of a projectile into a specific point of space and at specific moment of time is of the most importance in fire control systems. Changeable atmospheric conditions impede this task. First efforts for taking into account these changes were made in the break of XIX and XX centuries [1]. A few concepts and standards for providing information on meteo conditions and

uwzględniania ich zmian poczynając od tradycyjnych, wykorzystujących tabele poprawek (patrz sekcja 2), do możliwych dzięki rozwojowi technologii metod wykorzystujących symulację lotu pocisku.

W pracy przedstawiono porównanie kilku najbardziej rozpowszechnionych sposobów uwzględniania warunków meteorologicznych do wyznaczania nastaw działowych. Następnie zaprezentowane zostaną rezultaty wykorzystania tych metod w porównaniu z przypadkiem bez uwzględnienia jakiegokolwiek informacji o zmianie warunków atmosferycznych.

2. Wpływ parametrów atmosfery na tor lotu pocisku

Podstawowymi parametrami atmosfery wpływającymi na tor lotu pocisku są temperatura powietrza, ciśnienie atmosferyczne, gęstość powietrza oraz wiatr. Do opracowania tabel strzelniczych wykorzystywane są najczęściej dwie atmosfery standardowe: Normalna Atmosfera Artyleryjska zdefiniowana w pracy [2] oraz Atmosfera Standardowa ICAO [3].

Wartości parametrów atmosfery ICAO zostały obliczone z założeniem, że powietrze jest doskonałym gazem, wolnym od wilgoci i zanieczyszczeń oraz przy przyjęciu następujących wartości początkowych temperatury, ciśnienia i gęstości powietrza oraz prędkości dźwięku na poziomie morza [3]:

$$T_0 = 288,15 \text{ K}, P_0 = 1013,25 \text{ hPa}, \rho_0 = 1,2250 \text{ kg/m}^3, a_0 = 340,294 \text{ m/s}$$

Ciśnienie oraz gęstość powietrza można wyrazić jako funkcję temperatury oraz wysokości (wzory (1) i (2)). Dodatkowo, istotna dla zagadnień balistyki zewnętrznej, prędkość dźwięku również może być wyrażona przez funkcję temperatury (3). W związku z tym, najbardziej rozpowszechnionym sposobem opisu atmosfery stosowanym w balistyce jest profil wysokościowy temperatury powietrza, który można opisać wzorem (4). Wartości gradientu L_b oraz granice poszczególnych warstw można znaleźć w tabeli 1. Granice warstw zostały wrazone poprzez wysokość bazową czyli dolną granicę danej warstwy.

their changes had been created for many years. These methods start from conventional ones based on the tables (see section 2) and end on ones exploiting the simulation of projectile flight by modern technologies.

The paper shows a comparison of a few most popular methods which take into account meteo conditions for calculation of gun settings. In the next step the effects of using these methods are compared with a situation where no information on any changes of atmospheric conditions is used.

2. Impact of Atmosphere Conditions into Projectile Trajectory

Air temperature, atmospheric pressure, air density and wind are the basic parameters of atmosphere which affect the flying path of a projectile. Two following standard atmospheres are usually used for preparing firing tables: Normal Artillery Atmosphere defined in publication [2] and ICAO Standard Atmosphere [3].

The values of ICAO atmosphere parameters were calculated at the assumption that the air is a perfect gas without the humidity and pollution and for following initial values of air temperature, pressure and density, and velocity of the sound at the sea level [3]:

Pressure and density of the air may be expressed as a function of temperature and elevation (expressions (1) and (2)). The velocity of sound which is essential for external ballistics may be additionally expressed by the function of temperature (3). For this reason the elevation profile of air temperature that may be described by formulae (4) is a most popular way used in ballistics for description of atmosphere. Values of gradient L_b and borders of particular layers may be found in table 1. The borders of strata are expressed through a base elevation i.e. the bottom border of a specific stratum.

$$P = P_0 \exp \left(-\int_0^h \frac{Mg}{RT} dz \right) \quad (1)$$

$$\rho = \frac{PM}{RT} \quad (2)$$

$$a = 20,0468 \sqrt{T} \quad (3)$$

$$T = T_b + L_b (h - h_b) \quad (4)$$

gdzie: P - ciśnienie atmosferyczne, P_0 - ciśnienie na poziomie morza, M - masa molowa suchego powietrza, g - przyspieszenie grawitacyjne, R - stała gazowa, ρ - gęstość powietrza, T - temperatura powietrza, T_b - temperatura bazowa danej warstwy, h - wysokość geopotencjalna, h_b - geopotencjalna wysokość bazowa danej warstwy, a - prędkość dźwięku.

Dla sferycznego modelu Ziemi o promieniu R_z związek między wysokością geopotencjalną h , a wysokością geometryczną H jest następujący:

where: P - atmospheric pressure, P_0 - sea level pressure, M - dry air molar mass, g - gravity acceleration, R - gaseous constant, ρ - air density, T - air temperature, T_b - specific stratum base temperature, h - geopotential elevation, h_b - specific stratum base geo-potential elevation, a - sound velocity.

There is following dependence between geo-potential elevation h and geometrical elevation H for spherical Earth model with radius R_z :

$$h = \frac{R_z H}{R_z + H}$$

Tabela 1. Podział atmosfery zgodny z ICAO
 Table 1. Division of atmosphere according to ICAO

Warstwa Stratum	Geopotencjalna wysokość bazowa/ Geopotential base height h_b [m]	Geometryczna wysokość bazowa/ Geometrical base height H [m]	Temperatura Bazowa/ Base temperature T_b [K]	Gradient temperatury/ Temperature gradient L_b [K/m]
Troposfera Troposphere	0	0	288,15	-0,0065
Tropopauza Tropopause	11000	11019	216,65	0
Stratosfera Stratosphere	20000	20063	216,65	0,001
	32000	32162	228,65	0,0028
Stratopauza Stratopause	47000	47350	270,65	0
Mezosfera Mesosphere	51000	51413	270,65	-0,0028
	71000	71802	214,65	-0,002

Atmosfera Standardowa ICAO jest zgodnie ze STANAG 4119 wykorzystywana do tworzenia zasadniczych tabel strzelniczych,

ICAO Standard Atmosphere according to STANAG 4119 is used for preparing basic firing tables including data on gun

w których zawarte są informacje o nastawach działowych (kątach podniesienia i odchylenia lufy działa) i odpowiadających im: zasięgu, czasie lotu i prędkości końcowej pocisku. Dodatkowo tworzone są tabele poprawek uwzględniające odstępstwa rzeczywistych warunków od standardowych np. wiatr o niezerowej prędkości. Każdy z czynników zakłócających warunki strzelania wpływa na zmianę donośności lub wywołuje odchylenie boczne pocisku. W stosowanych powszechnie tabelach poprawek można znaleźć poprawki na wiatr boczny i podłużny, zmianę ciśnienia przyziemnego, odchyłki temperatury oraz gęstości balistycznej. Istnieją dwie szkoły wykorzystania tych poprawek przy wyznaczeniu nastaw działowych, związane z metodologią zestawiania tabel strzelniczych. W obu z nich uwzględnia się wiatr boczny oraz podłużny.

Różnice pojawiają się jednak w przypadku pozostałych parametrów. Jeden z wariantów zakłada uwzględnienie poprawki na ciśnienie przyziemne i temperaturę balistyczną (dotyczy tabel wykorzystujących komunikat Meteo11). W drugim przypadku uwzględnia się zmianę temperatury oraz gęstości balistycznej (dotyczy tabel wykorzystujących komunikat METB2). W obu przypadkach inaczej uwzględniany jest wpływ poszczególnych czynników. W pierwszym przypadku przyjmowane jest, że zmiana temperatury wpływa zarówno na gęstość powietrza, jak i prędkość dźwięku. W drugim przypadku, ze względu na osobną informację o zmianie gęstości, odchyłka temperatury informuje tylko o wpływie na prędkość dźwięku.

3. Wyznaczanie nastaw działowych z uwzględnianiem rzeczywistych warunków atmosferycznych

Istnieje kilka sposobów uwzględniania rzeczywistych warunków atmosferycznych do wyznaczaniu nastaw działowych artylerii przeciwlotniczej. Można je podzielić na trzy typy (patrz tab. 2). Dwa z nich wykorzystują standardowe komunikaty meteorologiczne, które można podzielić na komunikaty balistyczne (zawierające informacje o wielkościach i odchyłkach balistycznych) i te wykorzystywane w symulacjach toru lotu pocisku (zawierające pełne lub uśrednione informacje pomia-

settings (angles of elevation and bearings for gun barrel) with corresponding to them ranges, flying times and terminal velocity of projectile. Additionally the tables of corrections are prepared to take into account the deviations between real and standard conditions, e.g. the wind above zero velocity. Each of the conditions interfering with the firing conditions changes the range or side deviation the projectile. Commonly used tables of corrections include corrections for crosswise and alongside winds, ground level pressure changes, deviations of ballistic temperature and density. There are two ways of using these corrections for calculating gun settings depending on the methodologies applied at preparation of firing tables. Both of them take into account the parallel and crosswise wind.

The differences exist for other parameters. One option assumes the corrections caused by level ground pressure and ballistic temperature (for tables using Meteo11 message). The second case considers the change of ballistic temperature and density (for tables using METB2 message). The impact of particular factors is considered in different way for these two cases. In first case it is assumed that the change of temperature affects both the air density and velocity of sound. In second case the deviation of temperature provides information only about the impact on the sound velocity as there is a separate message on density changes.

3. Calculation of Gun Settings for Real Atmospheric Conditions

There are a few ways for taking into account the real atmospheric conditions at calculating the gun settings of anti-aircraft artillery. They may be divided on three types (see tab. 2). Two of them use the standard meteo messages which may be divided on ballistic messages (including data for ballistic values and corrections) and the ones used at simulations of projectile's trajectory (including complete or average measurement data on meteo conditions).

rowe o warunkach meteorologicznych). Trzeci typ metodologii uwzględniania zmian warunków atmosferycznych wykorzystuje tylko informacje o warunkach przyziemnych.

The third type of methodology for taking into account the deviations of atmospheric conditions uses exclusively data on ground level conditions.

Tabela 2. Porównanie metod uwzględniania zmian warunków atmosferycznych w algorytmach wyznaczania nastaw działowych

	Komunikaty balistyczne METB2, Meteo1	Komunikaty wykorzystywane przy symulacji METCM	Informacja o warunkach przyziemnych
Częstość pomiarów	Mała	Mała	Duża
Zmiany warunków z wysokością	Uwzględnia	Uwzględnia	Ekstrapoluje zmiany
Wymagana moc obliczeniowa	Mała	Duża (w zależności od sposobu wykorzystania - chwilowe lub ciągłe obciążenie)	Mała
Znajomość charakterystyk aerodynamicznych pocisku	Nie jest wymagana (wszystkie niezbędne informacje zawarte są w tabelach)	Wymagana	Nie jest wymagana (wszystkie niezbędne informacje zawarte są w tabelach)

Table 2. Comparison of methods for taking into account the deviations of atmospheric conditions in algorithms calculating the settings of guns

	Ballistic messages METB2, Meteo11	Messages used at simulation METCM	Message on ground level conditions
Measurement rates	Low	Low	Great
Dependence of conditions on elevation	Included	Included	Extrapolates the changes
Required computing power	Low	High (depending on way of using - momentary or continuous demand)	Low
Information on aerodynamic characteristics of a projectile	Not required (all necessary data are included in tables)	Required	Not required (all necessary data are included in tables)

3.1. Komunikaty balistyczne

Pierwszy sposób uwzględniania rzeczywistych warunków atmosferycznych polega na przygotowaniu dla pocisku tabel strzelniczych z uwzględnieniem tabel poprawek przystosowanych do konkretnego typu standardowego balistycznego komunikatu meteorologicznego. Takimi komunikatami są METB2 oraz Meteo-11 (Meteośredni). Zawarte w tych komunikatach informacje, w połączeniu z danymi z tabel poprawek pozwalają na wyznaczenie nastaw działowych umożliwiających trafienie w okreś-

3.1. Ballistic Messages

The first way that includes real atmospheric conditions is based on preparation of firing tables for a projectile which take into account the corrective tables adapted for a specific type of standard ballistic meteo message. METB2 and Meteo-11 (average meteo) are such messages. Information included in these messages is combined with corrective tables to provide the calculation of gun settings enabling the hitting into a specific spot at

lony punkt w warunkach opisanych przez komunikat. Zaletą takiej metodologii jest szybkość i prostota wykonywanych obliczeń. Komunikaty tego typu mogą być wykorzystywane zarówno w zautomatyzowanych systemach kierowania ogniem jak i w sposób ręczny przez operatora.

Wadą tego podejścia jest fakt, że balistyczne komunikaty meteorologiczne nie są sporządzane dla każdego typu amunicji oddzielnie. Skutkuje to koniecznością wprowadzenia dodatkowych poprawek na typ amunicji podczas sporządzaniu tabel strzelniczych.

Więcej informacji na ten temat można znaleźć w [1]. Dodatkowo komunikaty sporządzane są raz na kilka godzin i w zależności od panujących warunków pogodowych mogą szybko tracić na wiarygodności. Niewielka częstość pomiarów wynika z kosztów oraz czasochłonności ich przeprowadzania. Sugerowane interwały między pomiarami można znaleźć w [4].

3.2. Komunikaty wykorzystywane do symulacji

Drugim sposobem uwzględniania rzeczywistych warunków atmosferycznych do wyznaczaniu nastaw działowych jest pozyskanie informacji o tych warunkach i przeprowadzenie w nich symulacji lotu pocisku. Informacje takie można pozyskać ze standardowego komunikatu METCM, który zawiera uśrednione w warstwach dane pomiarowe dotyczące aktualnie panujących warunków atmosferycznych.

Oprócz tych informacji niezbędne są również dane dotyczące charakterystyk masowo-bezwładnościowych i aerodynamicznych pocisku. Pozwala to na rozwiązywanie zagadnienia odwrotnego balistyki zewnętrznej, czyli znajdowanie warunków początkowych (nastaw działowych) niezbędnych do trafienia pociskiem w zadany punkt [5]. Wadą tego sposobu jest złożoność obliczeniowa, skutkująca długim czasem obliczeń. Utrudnia to wykorzystanie tej metody w trybie *on-line* bez zastosowania komputerów o dużej mocy obliczeniowej. Możliwe jest jednak obejście tej niedogodności przez przeprowadzenie jednorazowego pakietu symulacji i sporządzenie swoistych dedykowanych dla danych warunków atmosferycznych tabel strzelniczych.

Podobnie jak w przypadku wykorzystania

conditions described in the message. Simplicity and speed of calculations are the benefits of this methodology. The messages of this type may be used both by automatic fire control systems and by operator in manual modes.

Disadvantage of this approach is the fact that ballistic meteorological messages are not issued separately for each type of ammunition. It causes that additional corrections for the type of ammunition have to be introduced at preparation of firing tables.

More information on that question is included in [1]. Moreover the messages are prepared for a few hours and depending on existing conditions they may lose the validity. The low rate of measurements is caused by costs and time needed for their development. Suggested time gaps between measurements may be found in [4].

3.2. Messages Exploiting Simulation

Second way for considering real atmospheric conditions in calculations of gun settings is the acquisition of data about the conditions and simulation of projectile's flight in these conditions. The data may be obtained from METCM standard message that consists of average measurement data about currently existing atmospheric conditions.

Apart of these conditions the data on projectile mass-inertia and aerodynamic characteristics are needed. It allows finding the solution for the reverse external ballistic question i.e. the initial conditions (gun settings) needed for hitting a predicted point by the projectile [5]. Disadvantage of this approach is caused by complex and time consuming calculations. For this reason the method cannot be used easily in *on-line* mode without computers with high computational power. This disadvantage may be overcome by carrying out a single block of simulations and preparation firing tables specifically dedicated for particular atmospheric conditions.

The low rate of measurements of at-

komunikatów balistycznych, wadą tej metody jest niewielka częstość przeprowadzania pomiarów warunków atmosferycznych.

3.3. Informacja o warunkach przyziemnych

Trzecim sposobem jest wykorzystanie tylko informacji o warunkach przyziemnych. Podobnie jak w pierwszym przypadku wymaga on przygotowania odpowiednich tabel strzelniczych, które zawierają poprawki ze względu na zmianę warunków przyziemnych. Metoda ta charakteryzuje się niewielkimi wymaganiami jeśli chodzi o moc obliczeniową. Dodatkowo przy założeniu, że armata jest wyposażona w stację meteo, metoda ta charakteryzuje się największą częstością pomiarów ze wszystkich opisanych w artykule metod.

Wadą jej jest jednak fakt, że pomiar przyziemny nie uwzględnia zmian parametrów atmosfery z wysokością (możliwa jest jedynie ekstrapolacja zmian z wysokością w oparciu o te pomiary). Nietrudno sobie wyobrazić sytuację, gdy armata znajduje się w osłoniętym przed wiatrem miejscu i po osiągnięciu przez wystrzelony pocisk pewnego pułapu zaczyna na niego oddziaływać wiatr o sile nieuwzględnionej przy wyznaczaniu nastaw. Jest to oczywiście tylko najprostszy przykład. Rzeczywiste zmiany warunków atmosferycznych z wysokością mają zazwyczaj bardziej skomplikowany przebieg niż to opisują zależności (1 - 4).

4. Badania symulacyjne

W celu porównania działania wszystkich trzech sposobów uwzględnienia zmian warunków atmosferycznych przy wyznaczaniu nastaw działowych oraz wykazania zasadności ich stosowania, przeprowadzono kompleksowe badania symulacyjne.

Idea wyznaczenia błędów w obliczeniu nastaw do strzelania artylerii przeciwlotniczej w rzeczywistych warunkach meteorologicznych oraz wynikających z tego tytułu uchybów pocisku względem celu była następująca:

- 1) Wykorzystując dane zawarte w *Tabelach strzelniczych 35 mm aminicji podkalibrowej FAPDS-T* [9] o parametrach lotu

atmosferycznych jest wadą tej metody. Podobnie jak w pierwszym przypadku wymaga on przygotowania odpowiednich tabel strzelniczych, które zawierają poprawki ze względu na zmianę warunków przyziemnych. Metoda ta charakteryzuje się niewielkimi wymaganiami jeśli chodzi o moc obliczeniową. Dodatkowo przy założeniu, że armata jest wyposażona w stację meteo, metoda ta charakteryzuje się największą częstością pomiarów ze wszystkich opisanych w artykule metod.

3.3. Data on Ground-level Conditions

The third way uses exclusively the information on ground level conditions. Similarly as in the first case it requires the preparation of special firing tables which include corrections caused by deviations of level ground conditions. This method needs low computational powers. Assuming additionally that the gun has its own meteo station this method has the greatest rate of measurements among those presented in the paper.

The disadvantage is that the ground level measurements do not include any changes of atmospheric parameters versus the elevation (only the extrapolation of changes as a function of height may be done on the base of these measurements). It is easy to imagine a situation when the gun is placed in the site that is screened against the wind and projectile after firing reaches the ceiling with a wind level that was not considered at calculating the settings. It is of course the simplest example. The real changes of atmospheric conditions along the height have usually more sophisticated profile than described by expressions (1 - 4).

4. Simulating Tests

In order to compare all three ways for dealing with changes of atmospheric conditions at calculating the gun settings and to show arguments for their use the complex simulating tests were carried out.

Following idea was behind the determination of errors at calculation of settings for firings of antiaircraft artillery guns in real meteorological conditions and values of projectile passing distances against the target caused by these errors:

- 1) Using data included in *Firing Tables for 35 mm Kinetic Ammunition*

oraz zasięgach pocisków w atmosferze standardowej ICAO, opracowano model matematyczny lotu pocisku i dokonano jego walidacji. Skorzystano ze zmodyfikowanego modelu ruchu pocisku traktowanego jako punkt materialny [6], a konkretnie z jego jawnej postaci przedstawionej w pracy [7] i zweryfikowanej w pracy [8]. Model ten, zgodnie ze STANGIEM 4355, jest predysponowany do zestawiania tabel strzelniczych oraz do obliczania nastaw we współczesnych systemach kierowania ogniem artylerii.

- 2) Na podstawie modelu matematycznego opracowano program komputerowy w środowisku Matlaba, umożliwiający obliczenie trajektorii lotu pocisku w rzeczywistych warunkach strzelania oraz rozwiązanie zagadnienia odwrotnego do obliczenia nastaw (pkt. 3.2). Umożliwiło to wyznaczenie głównych tabel strzelniczych oraz tabel poprawek odpowiadających komunikatowi meteorologicznemu METB2.
- 3) Wykorzystując opracowany program komputerowy obliczono nastawy działowe dla dziewięciu wariantów strzelania do celu znajdującego się na różnych wysokościach oraz w różnych odległościach od stanowiska ogniowego (ustalone punkty znajdują się wzdłuż prostej wyznaczonej przez kąt wizowania 500 [mils] (28.13°). Szczegółowy wykaz współrzędnych celu zamieszczono w tabeli 3.

Dla każdego z wariantów położenia celu względem SO rozpatrzono występowanie trzech przypadków rzeczywistych warunków atmosferycznych opisanych jako sytuacje meteorologiczne I, II oraz III. Pionowy profil gęstości oraz temperatury powietrza dla sytuacji I przedstawiono na rys. 1, natomiast na rys. 2 zaprezentowano profil wiatru dla tej sytuacji.

Analogicznie na rys. 3 oraz rys. 4 przedstawiono sytuację meteorologiczną II, a na rys. 5 i rys. 6 sytuację meteorologiczną III.

Dane o warunkach meteorologicznych w funkcji wysokości geometrycznej i odpowiadających im komunikatach meteorologicznych (METB2 i METCM) zostały pozyskane od firmy AVIOMET, lidera na rynku urządzeń prze-

FAPDS-T [9] with flying characteristics and ranges for ICAO standard atmosphere a mathematical model was developed for projectile trajectory and its validation was made. A modified model of projectile movement treated as a material point was used [6] and actually its explicit form presented in publication [7] and verified in [8]. According to Stanag 4355 this model is predestined for preparing firing tables and for calculation of the settings in contemporary artillery fire control systems.

- 2) Basing on the mathematical model a computer code was developed in Matlab environment to calculate projectile trajectory in real firing conditions and to find the solution of the reverse question for calculation of settings (pkt. 3.2). It enabled the calculation of main firing tables and corrective tables corresponding to METB2 meteo message.
- 3) Using developed software the settings for the gun were calculated for nine different options of firing to the target which was placed at different elevations and distances against firing position (FP) (selected points are placed along the line of aiming 500 [mils] (28.13°). Detailed list of target coordinates is presented in table 3.

For each option of target position against FP three versions of real atmospheric conditions marked as meteo situations I, II and III were considered. A vertical profile of air density and temperature for situation I is presented in Fig. 1 and the wind profile for this situation is presented in Fig. 2.

In similar way the meteo situation II is presented in Fig. 3 and Fig. 4 and the meteo situation III in Fig. 5 and 6.

Data on meteo conditions in function of geometrical height and corresponding to them meteo messages (METB2 and METCM) were acquired from AVIOMET company that is a leader on the market deal-

znaczonych do wykonywania pomiarów meteorologicznych.

ing with instruments for meteo measurements.

Tabela 3. Współrzędne punktów trafienia
 Table 3. Coordinates of hitting points

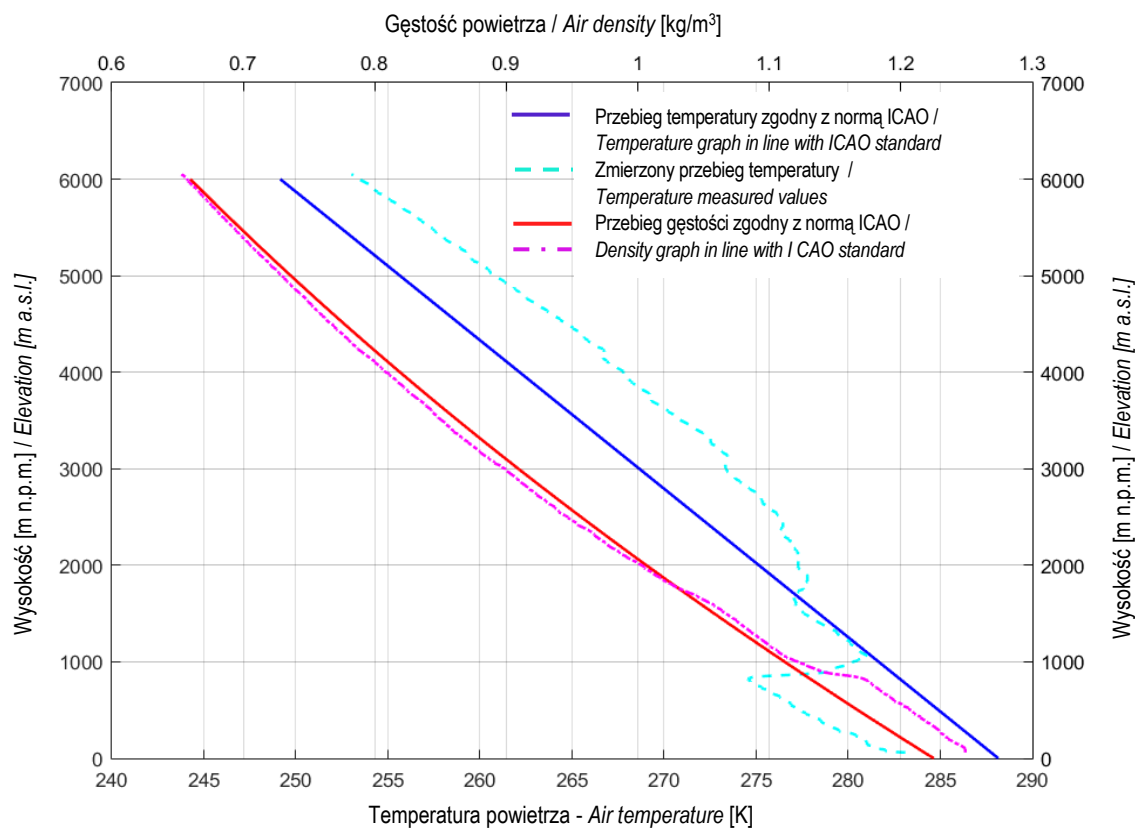
Odległość nachylona do celu / Radial distance to target R [m]	Odległość w osi/ Distance along axis x_t [m]	Odległość w osi/ Distance along axis y_t [m]	Odległość w osi/ Distance along axis z_t [m]
500	441.0	0.0	235.7
1000	881.9	0.0	471.4
1500	1322.9	0.0	707.1
2000	1763.8	0.0	942.8
2500	2204.8	0.0	1178.5
3000	2645.8	0.0	1414.2
3500	3086.7	0.0	1649.9
4000	3527.7	0.0	1885.6
4500	3968.6	0.0	2121.3

Pomiary tego typu przeprowadza się z wykorzystaniem radiosondy wyposażonej w odpowiednie czujniki i unoszącej się wraz z balonem sondażowym. Następnie z uzyskanych danych stacja meteorologiczna oblicza i zestawia standardowe komunikaty meteorologiczne. Tak zostały sporządzone wszystkie wykorzystane w trakcie badań standardowe komunikaty meteorologiczne.

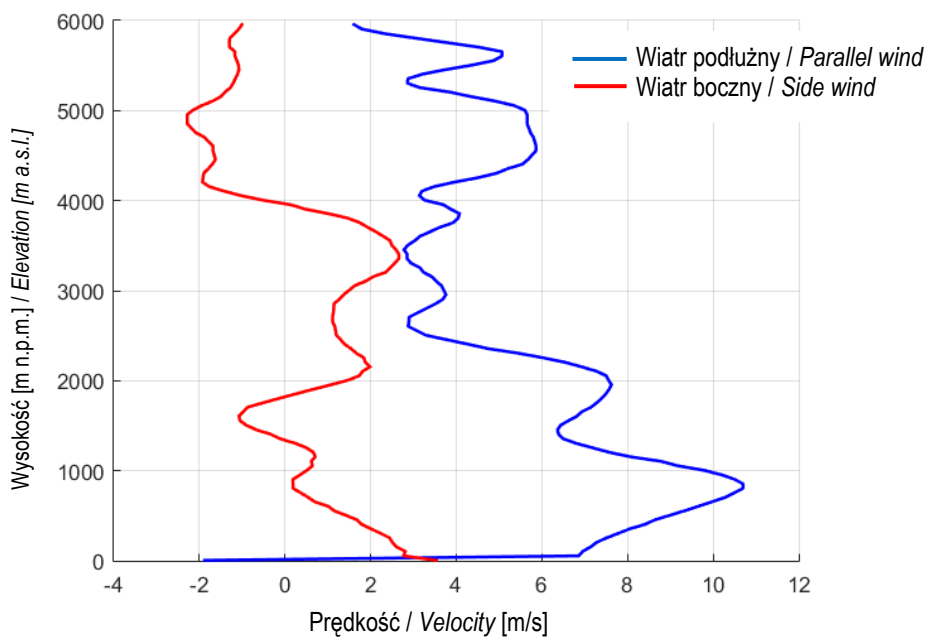
- 4) W celu zbadania wpływu rzeczywistych warunków meteorologicznych na błędy popełniane podczas strzelania rozpatrzono cztery sposoby wykorzystania informacji o warunkach meteorologicznych:
- brak jakiegokolwiek informacji o panujących warunkach meteorologicznych;
 - wykorzystanie informacji o przyziemnych warunkach meteorologicznych;
 - wykorzystanie danych z komunikatu METB2 (za wysokość wejściową wyboru grupy dla określenia meteorologicznych warunków strzelania przyjęto wysokość położenia celu);
 - użycie danych z komunikatu METCM.

These measurements are carried out by using radio probe with suitable sensors onboard of balloon flying upward. Next the meteo station calculates and prepares standard meteo messages. In this way all standard meteo messages used in the tests were prepared.

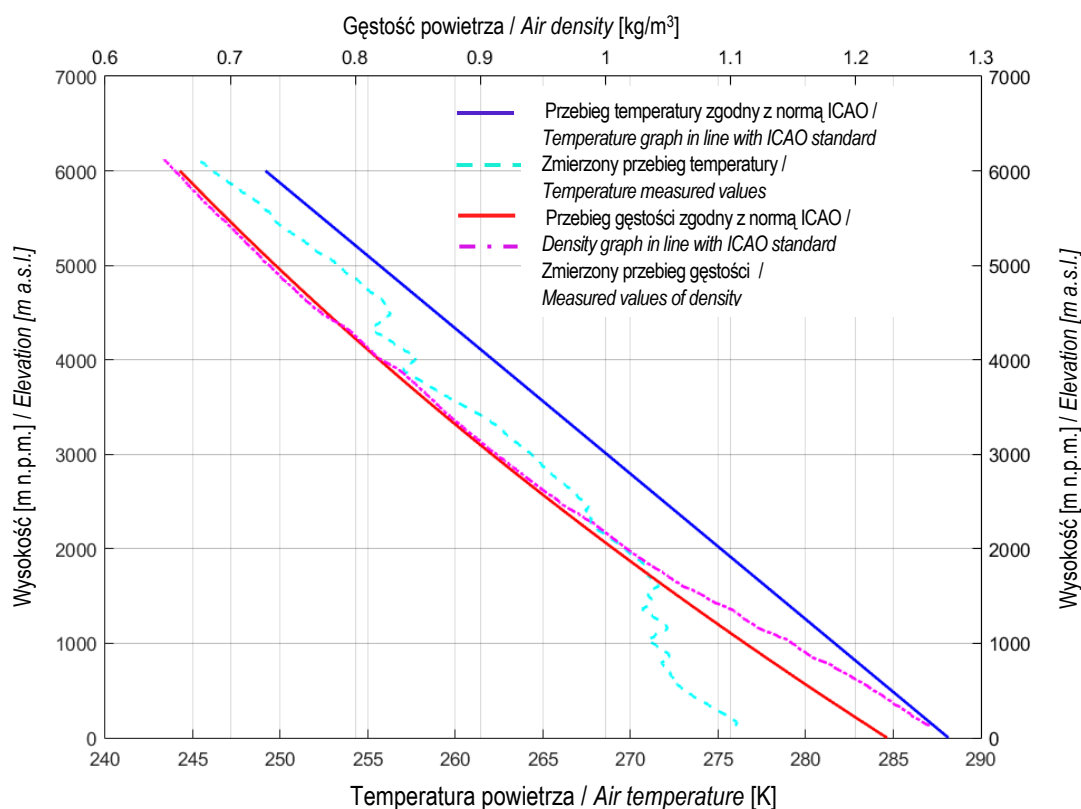
- 4) In order to check the impact of real meteorological conditions into the errors occurring at firing the four ways of using meteo conditions data were considered:
- Lack of any information on existing meteo conditions;
 - The use of information on ground level meteo conditions;
 - Using data from METB2 message (the elevation of the target position was taken as group selection input height for specification of meteo firing conditions);
 - Using data from METCM message.



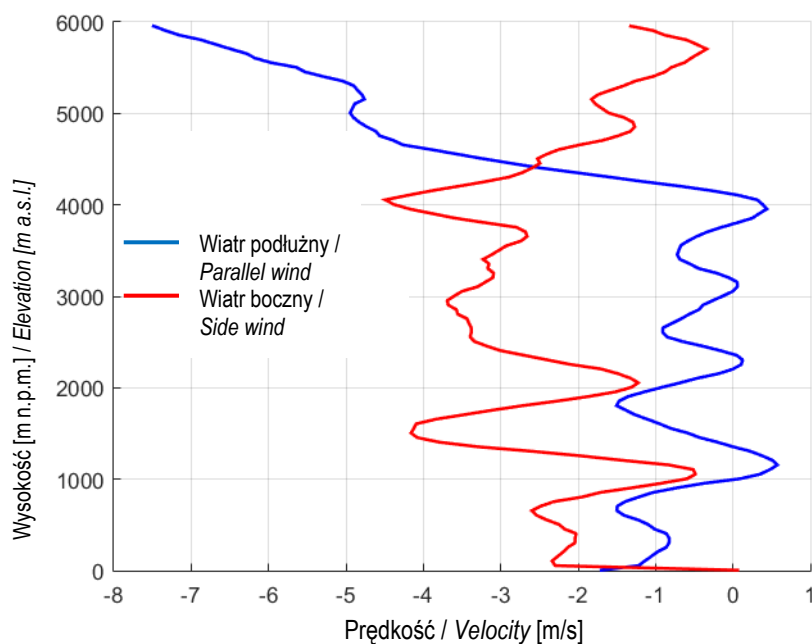
Rys. 1. Profil pionowy temperatury i gęstości powietrza - sytuacja meteorologiczna I
Fig. 1. Vertical profile of air temperature and density – meteo situation I



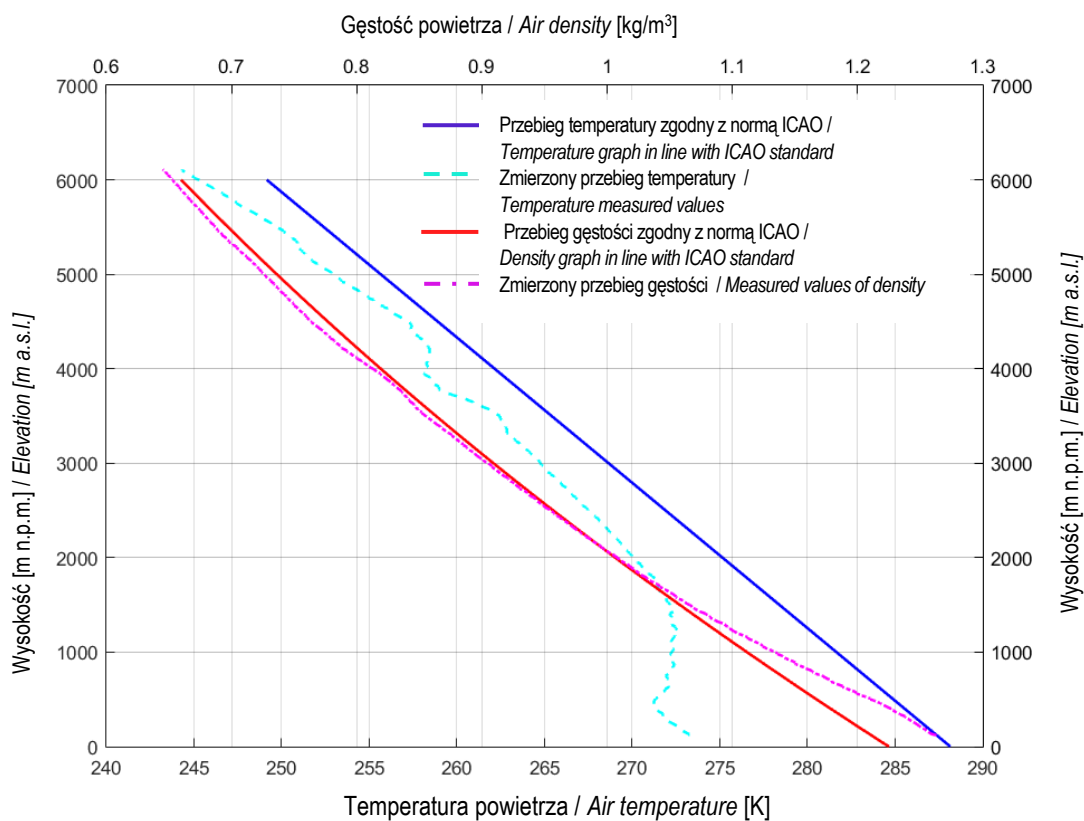
Rys. 2. Profil pionowy wiatru - sytuacja meteorologiczna I
Fig.2. Vertical profile of wind – meteo situation I



Rys. 3. Przebieg temperatury i gęstości powietrza - sytuacja meteorologiczna II
Fig. 3. Changes of air temperature and density - meteo situation II

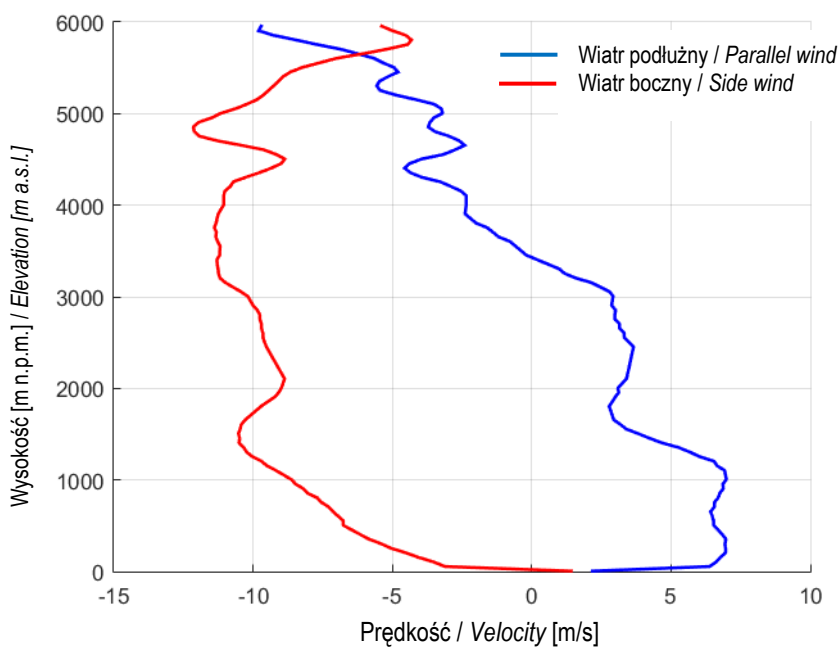


Rys. 4. Profil pionowy wiatru - sytuacja meteorologiczna II
Fig. 4. Vertical profile of wind – meteo situation II



Rys. 5. Przebieg temperatury i gęstości powietrza - sytuacja meteorologiczna III

Fig. 5. Changes of air temperature and density - meteo situation III



Rys. 6. Profil pionowy wiatru - sytuacja meteorologiczna III

Fig. 6. Vertical profile of wind - meteo situation III

5) Błędy trafienia, przedstawione na rys. 7, 8 i 9, wyznaczono jako minimalną odległość symulowanego komputerowo przelotu pocisku względem celu z uwzględnieniem rzeczywistych warunków meteorologicznych pozyskanych od firmy AVIOMET, przy czym nastawy działowe (warunki początkowe symulacji – kąt pochylenia i odchylenia lufy działa) odpowiadały:

- w sytuacji braku jakiejkolwiek informacji o panujących warunkach meteorologicznych - nastawom tabelarycznym bez uwzględnienia poprawek na meteorologiczne warunki strzelania,
- w sytuacji wykorzystania informacji o przyziemnych warunkach meteorologicznych - nastawom działowym uzyskanym z rozwiązania zagadnienia odwrotnego lotu pocisku w następujących warunkach atmosferycznych: stały wiatr niezależnie od wysokości lotu pocisku, pozostałe parametry atmosfery wyznaczone według zależności (1-4) atmosfery standardowej ICAO, przy czym wartości P_0 i T_b na początku pierwszej warstwy odpowiadają wartościom temperatury i ciśnienia powietrza przyziemnego,
- w sytuacji wykorzystania danych z komunikatu METB2 - nastawom tabelarycznym obliczonym z uwzględnieniem poprawek na meteorologiczne warunki strzelania,
- w sytuacji wykorzystania danych z komunikatu METCM - nastawom działowym uzyskanym z rozwiązania zagadnienia odwrotnego lotu pocisku w warunkach atmosferycznych określonych w komunikacie METCM.

Wyniki obliczeń całkowitego błędu trafienia (dla sytuacji meteorologicznych I, II i III) otrzymane na podstawie wyżej omówionego algorytmu, przedstawiono na rysunkach 7-9. Błąd trafienia rozumiany jest jako minimalna odległość symulowanego komputerowo przelotu pocisku względem celu z uwzględnieniem rzeczywistych warunków meteorologicznych.

Dla wszystkich sytuacji meteorologicznych można zauważyć zmniejszenie błędu w przypadku wykorzystania komunikatów meteorologicznych w porównaniu z brakiem uwzglę-

5) Hitting errors presented in figures 7, 8 and 9 were determined as the minimal passing distance of computer simulated projectile trajectory to the target when real meteo conditions obtained from AVIOMET company were considered and the gun settings (initial conditions of simulation – angle of gun barrel elevation and bearing) corresponded to:

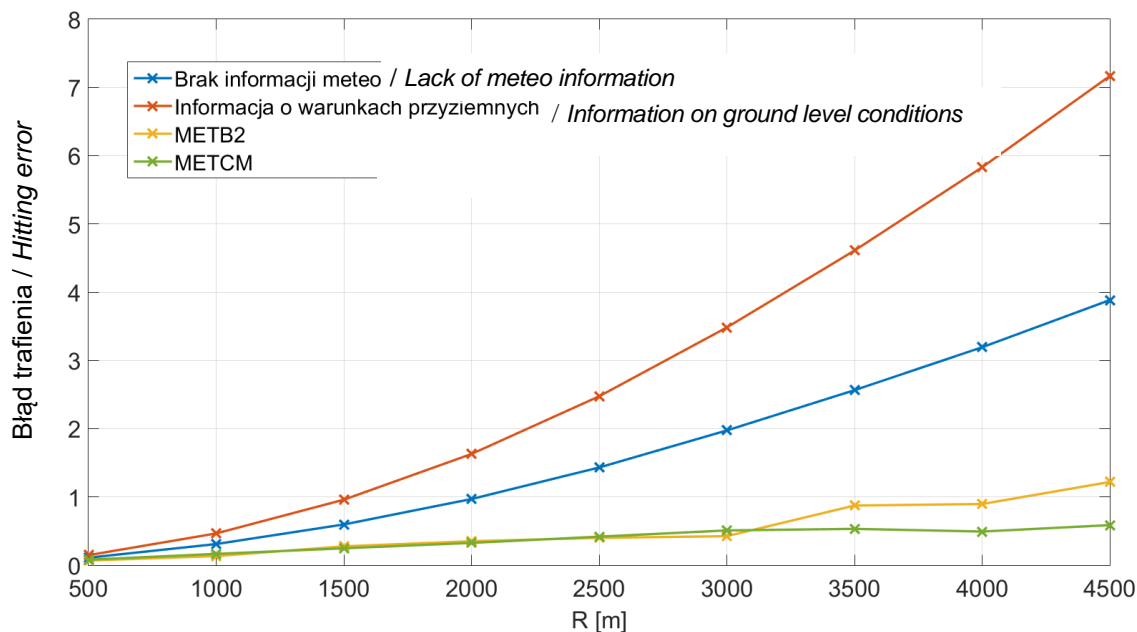
- In case of lacking any information on existing meteorological conditions – tabular settings without considering any corrections for meteorological firing conditions.
- In case of using the ground level meteo conditions information – gun settings received from the solution of question of projectile reverse flight at following atmospheric conditions: unchangeable wind for every height of projectile flight, the remaining parameters of atmosphere calculated from expressions (1-4) for ICAO standard atmosphere whereas the values P_0 and T_b for the starting part of the first stratum correspond to values of air temperatures and pressures at ground level.
- In case of using data from METB2 message – tabular settings calculated with the consideration of corrections for meteorological conditions of firing.
- In case of using data from METCM message – gun settings received from solution of the question of projectile reverse flight at atmospheric conditions specified in METCM message.

Results of calculations of a total hitting error (for meteorological situations I, II and III) received on the base of the algorithm described above are presented in figures 7-9. The error of hitting is defined here as a minimal passing distance of computer simulated projectile flight to the target with consideration of real meteorological conditions.

All meteorological situations indicate the reduction of the error in the cases when meteo messages are used comparing to the case when the changes of atmospheric con-

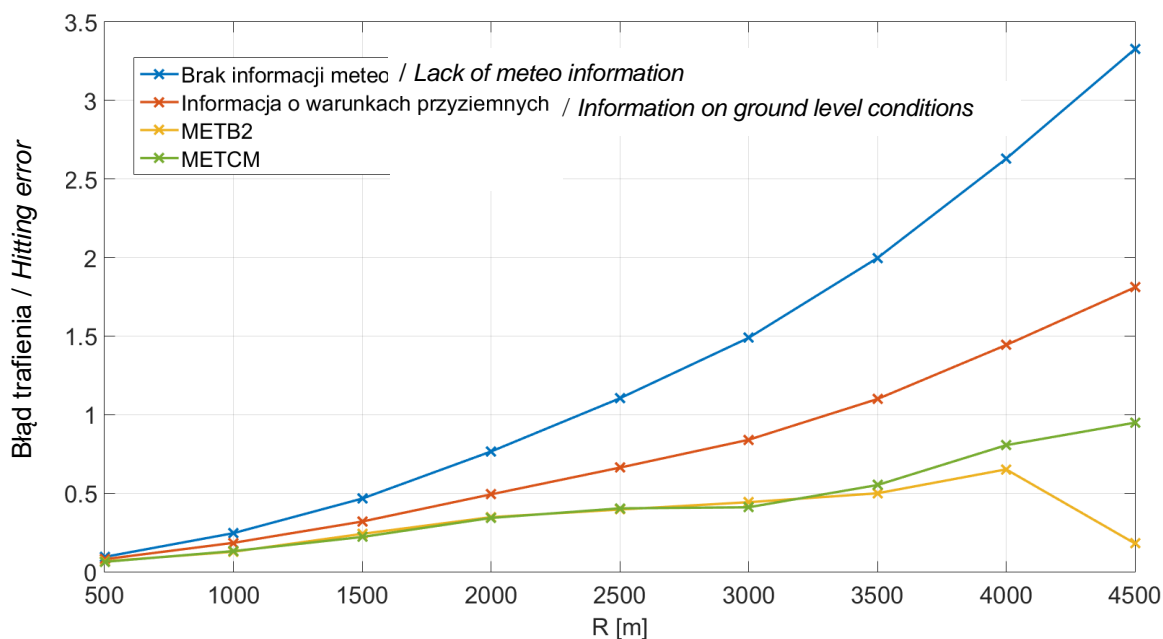
dnienia zmian warunków atmosferycznych. Błędy dla wszystkich rodzajów komunikatów meteorologicznych są na podobnym poziomie i nie wskazują jednoznacznie na jeden typ komunikatu zapewniającego minimalizację błędów w każdej sytuacji meteorologicznej.

ditions are not taken into account. The errors for all types of meteo messages are on a comparable level and they do not suggest clearly a specific type of the message that could minimise the error for each meteorological situation.



Rys. 7. Błąd trafienia - sytuacja meteorologiczna I

Fig. 7. Hitting error - meteo situation I



Rys. 8. Błąd trafienia - sytuacja meteorologiczna II

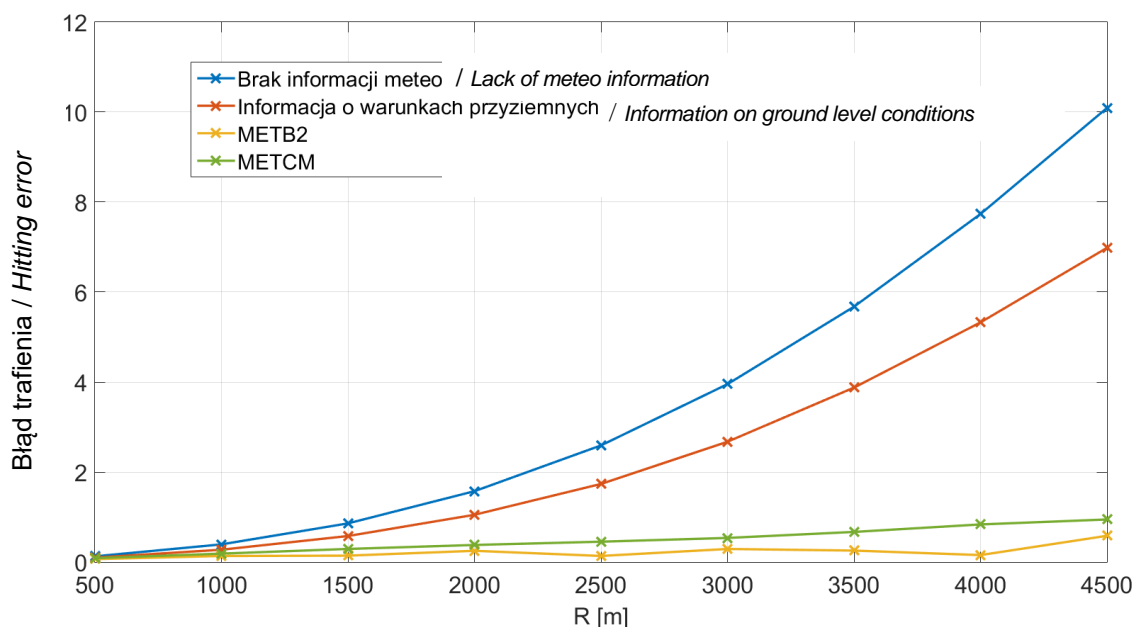
Fig. 8. Hitting error - meteo situation II

W przypadku wykorzystania tylko informacji o warunkach przyziemnych można zaobserwować zmniejszenie błędu dla sytuacji II i III. Błąd ten jest jednak większy niż w przypadku skorzystania ze standardowych komunikatów meteorologicznych. Zdecydowany wzrost wartości błędu następuje dla punktów trafienia znajdujących się w odległości R powyżej 2000 m (wysokość położenia celu wynosi wtedy ok. 1000 m).

W przypadku sytuacji I błąd wynikający z wykorzystania informacji przyziemnej jest większy niż w przypadku braku jakiegokolwiek informacji meteorologicznej. Wynika to z rzeczywistego profilu temperatury oraz gęstości. Przyjęte powszechnie zasady ekstrapolacji wartości danych z pomiarów przyziemnych nie uwzględniają wpływów ukształtowania i rodzaju podłoża, stabilności atmosfery w warstwie lotu pocisku, dobowego i sezonowego przebiegu zmian elementów meteorologicznych. Na rys. 1 można zaobserwować gwałtowną, niemal skokową, zmianę wartości tych parametrów. Wprowadza to duży błąd przy wyznaczaniu nastaw działowych, dla punktów trafienia znajdujących się na wysokości powyżej 1000 m.

In case when the information on ground level conditions is exclusively used a reduction of the error may be observed for situation II and III. Nevertheless this error is greater than in the case of using standard meteo messages. Significant increase of error levels happens for hitting points placed at the distances R above 2000 m (the altitude of target position is then ca. 1000 m).

In the case of situation I the error resulting from using ground level information is greater than in the case when there is the lack of any meteo information at all. It is caused by the actual profile of temperature and density. The rules of extrapolation which are commonly accepted do not include the impacts of the relief and type of the ground, stability of atmosphere within the strata of projectile flight, night and day and seasonal changes of meteorological factors. There is a rapid or almost surging change of these parameters presented in Fig. 1. It generates a large error at calculating the gun settings for hitting points positioned on greater altitudes than 1000 m.



Rys. 9. Błąd trafienia - sytuacja meteorologiczna III

Fig. 9. Hitting error - meteo situation III

5. Wnioski końcowe

Z przeprowadzonych badań wynika, że dla rozpatrywanych rzeczywistych warunków atmosferycznych wykorzystanie standardowych komunikatów meteorologicznych daje najlepsze rezultaty jeśli chodzi o minimalizację błędu trafienia. Niemożliwe jest jednak określenie najskuteczniejszego z nich, ze względu na podobny stopień zmniejszenia błędu we wszystkich przypadkach. W związku z czym, przy wyborze komunikatu należałoby brać pod uwagę właściwości komunikatów opisane w rozdziale 3.

Wykorzystanie informacji o warunkach przyziemnych zmniejsza błąd w satysfakcjonujący sposób na niewielkich odległościach strzelania. W przypadku bardziej oddalonych celów następuje zwiększenie błędu trafienia. Taki sposób uwzględnienia informacji o zmianach warunków meteorologicznych nie zapewnia pełnej informacji o aktualnie panujących warunkach atmosferycznych, przez co może generować duże błędy. Jest to widoczne w przypadku sytuacji meteorologicznej I.

Niezależnie od przyjętego sposobu uwzględnienia zmian warunków atmosferycznych, konieczność ich uwzględnienia w procesie wyznaczania nastaw wydaje się niepodważalna. Brak jakiegokolwiek informacji skutkuje dużym błędem trafienia, rosnącym wraz z odległością do celu. Należy również mieć na uwadze, że błędy trafienia przedstawione na rys. 7-9, dotyczą przykładowych rzeczywistych warunków atmosferycznych nieodbiegających znacząco od warunków atmosfery standardowej. W bardziej ekstremalnych warunkach atmosferycznych (większe odchyłki temperatury i ciśnienia oraz większa prędkość wiatru) należy się spodziewać jeszcze większych błędów.

Literatura / Literature

- [1] Cech V., Jedlicky L., Jevicky J., Problem of the Reference Height of the Projectile Trajectory as a Reduced Meteo-ballistic Weighting Factor, *Defence Technology*, tom 10, nr 2, pp. 131-140, 2014.
- [2] ДМИТРИЕВСКИЙ А. А., *Баллистика и навигация ракет*, Машиностроение, Москва 1985.
- [3] *Manual of the ICAO Standard Atmosphere (extended to 80 kilometres (262 500 feet)) (Third ed.)*, International Civil Aviation Organization, 1993.

5. Final Conclusions

The performed tests indicate that for considered real atmospheric conditions the best results in reduction of hitting errors are secured at using standard meteorological messages. However it is not possible to indicate the most effective type of message as there is a similar level of error's reduction in each case. For this reason it would be sensible to consider the characteristics of messages described in chapter 3.

The use of information on ground level conditions provides a satisfactory reduction of the error for short firing ranges. In the case of more distant targets the hitting error increases. Such way of using the information about changes of meteorological conditions does not provide complete data on currently existing atmospheric conditions and it may generate significant errors. It is visible in the case of meteorological situation I.

No matter what way of considering the changes for atmospheric conditions was accepted it seems that the need for their use is well substantiated. The lack of any information results in high hitting errors which increase with the distance to the target. It is worth to notice that the hitting errors presented in figures 7-9 relate to some exemplary actual atmospheric conditions which do not differ substantially from conditions of standard atmosphere. For more extreme atmospheric conditions (greater deviations of temperature and pressure and greater velocity of wind) the greater errors have to be expected.

-
- [4] *Tactics, Techniques, and Procedures for Field Artillery Meteorology*, Headquarters, Department of the Army, 2007.
- [5] Chusilp P., Charubhun W., Nutkumhang N., Investigating an Iterative Method to Compute Firing Angles for Artillery Projectiles, *The 2012 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Kaohsiung, 2012.
- [6] Liske R., Reiter M., *Equations of Motion for Modified Point Mass Trajectory*, report no. 1314, Ballistic Research Laboratories, Aberdeen Proving Ground, Maryland, 1966.
- [7] Baranowski L., Gadomski B., Majewski P., Szymonik J., Explicit “Ballistic M-model”: a Refinement of the Implicit “Modified Point Mass Trajectory Model,” *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*, tom 64, nr 1, pp. 81-89, 2016.
- [8] Baranowski L., Gadomski B., Majewski P., Szymonik J., Comparison of Explicit and Implicit Forms of the Modified Point Mass Trajectory Model, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, Vol. 54, no. 4, pp. 1183-1195, 2016.
- [9] *Tabele do strzelnia przeciwlotniczego dla 35 mm amunicji FAPDS-T „MESKO”*, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Warszawa, 2003.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2013-2015
jako projekt badawczy rozwojowy nr O ROB 0046 03 01
The scientific work was financed from assets allocated for science in 2013-2015
as a research and development project No O ROB 0046 03 01

