

Kielce, dnia 10.02.2019 r.

dr hab. inż. Izabela Krzysztofik  
Politechnika Świętokrzyska  
Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn  
Katedra Techniki Komputerowych i Uzbrojenia

## **RECENZJA**

rozprawy doktorskiej **mgra inż. Tomasza Merdy**

pt. „Modelowanie i badanie parametrów balistyki zewnętrznej naddźwiękowych pocisków  
moździerzowych”

Podstawa wykonania recenzji: pismo zastępcy przewodniczącego Rady Naukowej Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych prof. dr hab. inż. Józefa Żurka z dnia 19 listopada 2018 r. oraz pismo sekretarza Rady Naukowej ITWL dra inż. Grzegorza Kowalczyka z dnia 16 stycznia 2019 r. z prośbą o wykonanie recenzji, w związku z powołaniem na recenzenta przez Radę Naukową ITWL.

### **1. Sylwetka Doktoranta**

Mgr inż. Tomasz Merda rozpoczął w 2005 roku studia na Wydziale Mechatroniki Wojskowej Akademii Technicznej, na kierunku mechatronika, specjalność *konstrukcja i technologia broni*. W 2010 roku obronił pracę magisterską pt. „Pocisk artyleryjski o zwiększonym zasięgu” i otrzymał tytuł zawodowy magistra inżyniera. W tym samym roku rozpoczął pracę w Wojskowym Instytucie Technicznym Uzbrojenia, gdzie pracuje do dziś. Przechodził kolejno stanowiska inżynier, starszy inżynier oraz asystent. Obecnie pracuje w Zakładzie Balistyki. Zajmuje się projektowaniem oraz badaniem amunicji artyleryjskiej. Specjalizuje się w zagadnieniach balistyki zewnętrznej.

W swoim dorobku naukowym Doktorant posiada 8 publikacji w czasopiśmie naukowych oraz 9 referatów na konferencjach uzbrojeniowych, w tym 3 na konferencjach zagranicznych (International Symposium on Ballistics w Wielkiej Brytanii i w Stanach Zjednoczonych oraz International Conference on Defence Technology w Chinach).

## 2. Zakres i charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska pt. „*Modelowanie i badanie parametrów balistyki zewnętrznej naddźwiękowych pocisków moździerzowych*” obejmuje 103 strony, w tym: streszczenie i słowa kluczowe po polsku i angielsku (po 1 stronie), 2 strony spisu treści, 3 strony wykazu rysunków (64 pozycje), 4 strony wykazu oznaczeń, skrótów i pojęć oraz 3 strony spisu bibliografii zawierającego 34 pozycje uporządkowane w kolejności pojawiania się w tekście rozprawy.

Praca została podzielona na sześć rozdziałów. Dotyczy badań nad nową amunicją moździerzową o kryptonimie RAK-AMUNICJA. Przedstawia analizę parametrów toru lotu naddźwiękowych pocisków moździerzowych opartą na metodzie numerycznej mechaniki płynów zastosowanej do wyznaczania współczynników aerodynamicznych. Oprócz wyników badań eksperymentalnych i numerycznych zawiera wskazówki dla konstruktorów tego typu amunicji. Autor identyfikuje również możliwe przyczyny nieprawidłowego lotu pocisków oraz wskazuje na problemy i zjawiska wymagające dalszej analizy. Praca ma charakter teoretyczno-doświadczalny oraz potencjał aplikacyjny.

*Rozdział 1* stanowi wstęp rozprawy. Doktorant krótko przedstawił genezę pracy i główne wymagania stawiane nowej amunicji, zapisane w Założeniach Taktyczno-Technicznych. Następnie dokonał przeglądu stanu wiedzy dotyczącej konstrukcji pocisków moździerzowych stosowanych na świecie. Zwrócił uwagę na brak dostępnych danych dotyczących charakterystyk aerodynamicznych dla naddźwiękowych pocisków moździerzowych, co skłoniło go zajęcia się opracowaniem metodyki wyznaczania tychże charakterystyk właśnie dla pocisków poruszających się z prędkościami naddźwiękowymi. Sformułował cel główny pracy, który brzmi: *Opracowanie modelu lotu naddźwiękowych pocisków moździerzowych, zawierającego nowoczesną metodykę wyznaczania ich charakterystyk aerodynamicznych, zapewniającą dokładność identyfikacji torów lotu uzasadnioną praktyką artyleryjską.* Ponadto sformułowano siedem celów dodatkowych, które są realizowane w kolejnych rozdziałach rozprawy. Rozdział pierwszy kończy krótkie streszczenie każdego rozdziału rozprawy.

*Rozdział 2* to dość znaczny cześć pracy poświęcona modelowaniu zjawisk balistyki zewnętrznej amunicji moździerzowej. Na początku Doktorant przytoczył kadry materiału filmowego otrzymanego podczas badań poligonowych różnych typów amunicji moździerzowej. Zarejestrowano proces strzelania z moździerza RAK lub ze stendu dla pocisku OF-843 B, pocisków RAK wariant 1 i 2 oraz dla 98 mm pocisków oświetlających. Przeprowadził analizę dostępnego materiału filmowego pod kątem położenia kąтового pocisku w kolejnych chwilach czasu. Następnie opisał dane pomiarowe i sposób ich

otrzymywania z radaru Dopplera. Uzyskiwane dane i przytoczone zależności pozwoliły na opracowanie programu komputerowego do wyznaczania współczynnika  $C_R$  wypadkowej siły aerodynamicznej. Program został napisany w środowisku GNU Octave. Po analizie materiału filmowego oraz uzyskanego z badań symulacyjnych przebiegu zmienności współczynnika  $C_R$  Doktorant wysnuł wniosek, iż dla pocisków naddźwiękowych należy do opisu lotu zastosować model pocisku jako bryły sztywnej, a nie jako punkt materialny. Następnie Autor rozprawy zaprezentował, na ile było to możliwe, ogólny kształt i wymiary konstrukcyjne następujących pocisków: OF-843 B, RAK wariant 1, RAK wariant 2, RAK wariant 3. Uważam, że ten opis pocisków powinien znajdować się już na końcu rozdziału pierwszego. Ułatwiłoby to znacznie czytanie pracy.

Kolejna część rozdziału przedstawia model fizyczny pocisku wraz ze zdefiniowanym układem współrzędnych, siłami i momentami działającymi na pocisk oraz przyjętymi założeniami. Do wyznaczania współczynników aerodynamicznych w funkcji liczby Macha i kąta nutacji Doktorant zastosował metodę CFD (numeryczna mechanika płynów). Wykorzystał dostępne na rynku oprogramowanie ANSYS Fluent. Do wyznaczania współczynnika  $C_t$  tłumienia prędkości nutacyjnej posłużyła prosta zależność Brysona. Model bryłowe pocisków wykorzystywanych w obliczeniach wykonano w programie Autodesk Inventor na podstawie dokumentacji konstrukcyjnych analizowanych wariantów pocisków moździerzowych. Siatki obliczeniowe zostały wykonane w programie ICFM CFD. Obliczenia w programie ANSYS Fluent przeprowadzono z wykorzystaniem metody opartej na gęstości. Jako model turbulencji przyjęto model  $k-\omega$ .

Następnie Doktorant prezentuje, na podstawie cytowanej pozycji literatury [4], model matematyczny ruchu pocisku traktujący go jako bryłę sztywną o sześciu stopniach swobody, a następnie jego uproszczenie dla prędkości obrotowej  $p_k=0$ . Otrzymany model matematyczny o pięciu stopniach swobody został zaimplementowany w programie komputerowym opracowanym, jak poprzednio, w środowisku GNU Octave, którego algorytm został objaśniony na końcu tego rozdziału.

W *Rozdziale 3* zawarto wyniki badań zarówno eksperymentalnych jak i symulacyjnych. Na podstawie danych uzyskanych z radaru Dopplera i opracowanego przez siebie programu opisanego w rozdziale drugim Doktorant wyznaczył współczynnik wypadkowej siły aerodynamicznej dla każdego z czterech wariantów rozpatrywanych pocisków moździerzowych. Na wykresach przedstawił przebieg zmienności współczynnika  $C_R$  w funkcji liczby Macha, trajektorie lotów pocisków a w przypadku pocisku RAK wariant 2 również wartości odchyłek bocznych.

Kolejno Doktorant prezentuje, uzyskane z wykorzystaniem oprogramowanie CFD, wartości współczynników aerodynamicznych  $C_{x0}$ ,  $C_{y0}$  i  $C_{m0}$  dla czterech wariantów pocisków moździerzowych. Przedstawia na wykresach porównanie współczynnika  $C_R$  i  $C_{x0}$ , co ma sens, jak sam zauważa, dla kąta nutacji równego zero. Przy każdym wariacie badanych pocisków dokonuje analizy otrzymanych wyników.

W *Rozdziale 4* dokonano weryfikacji opracowanej metodyki wyznaczania parametrów lotu naddźwiękowych pocisków moździerzowych. Doktorant przeprowadził szereg badań symulacyjnych lotu badanych pocisków moździerzowych z wykorzystaniem współczynników aerodynamicznych wyznaczonych metodami CFD. Przedstawił na wykresach porównanie otrzymanych trajektorii lotu z badań symulacyjnych i eksperymentalnych. Przy każdym wariacie pocisku wysunął wnioski z analizy porównawczej.

Należy podkreślić, że wyniki przedstawione w tym rozdziale pracy potwierdziły, iż opracowana przez Doktoranta metodyka jest wystarczająco dokładna. Różnice pomiędzy wynikami eksperymentalnymi a obliczanymi są mniejsze niż błąd dopuszczalny.

*Rozdział 5* dotyczy oszacowania wpływu wybranych sekcji pocisku na jego charakterystyki aerodynamiczne. Doktorant, z wykorzystaniem oprogramowania ANSYS Fluent dokonał analizy rozkładu ciśnień na powierzchni pocisków kolejno OF-843 B oraz wariant 1, 2 i 3 oraz oszacował wpływ poszczególnych części na sumaryczny opór pocisku (dla wariantu 3 pocisku, ze względu na tajemnicę przedsiębiorstwa to oszacowanie nie jest prezentowane).

Istotnym jest, iż przeprowadzone analizy były jednym z elementów mających wpływ na opracowanie kształtu pocisku w wariacie 3.

W ostatnim, *Rozdziale 6*, Doktorant zawarł wnioski końcowe. Najważniejszym wnioskiem jest to, że opracowana przez Doktoranta metodyka modelowania i badania parametrów lotu naddźwiękowych pocisków moździerzowych pozwala na określenie przebiegu trajektorii ruchu pocisku z wystarczającą, dla praktyki artyleryjskiej, dokładnością. Wartość błędu donośności dla badanych pocisków nie przekracza 3%. Cel główny pracy został zatem osiągnięty.

Ponadto Doktorant wskazał zalety i wady opracowanej metody. Zidentyfikował problemy i zjawiska wymagające dalszej analizy przez autora pracy.

*Rozprawa zakończona* jest spisem bibliograficznym obejmującym 34 pozycje, w tym 4 pozycje współautorskie i 1 samodzielna.

### 3. Ogólna ocena rozprawy

Rozprawa związana jest z prowadzonymi obecnie pracami dotyczącymi wdrożenia do produkcji nowoczesnej amunicji moździerzowej spełniającej wymagania związane z programem RAK-AMUNICJA. Doktorant podjął się trudnego zadania opracowania metodyki analizy parametrów lotu dla naddźwiękowych pocisków moździerzowych, wykorzystującej metody numerycznej mechaniki do wyznaczania współczynników aerodynamicznych.

Ogólnie, układ i struktura rozprawy są poprawne. Przedstawiona jest geneza, krótki przegląd literatury przedmiotu oraz cel pracy i obiekt badań. Jak już wcześniej wspomniałam opis badanych w pracy pocisków powinien znajdować się już na końcu rozdziału pierwszego, co znacznie ułatwiłoby czytanie pracy. Rozdział 2 jest dość obszerny. Uważam, że mógłby być podzielony na dwa osobne rozdziały. Jeden obejmujący analizę wyników eksperymentalnych a drugi model fizyczny, matematyczny oraz opis programu do symulacji lotu pocisków. W tym miejscu powinien się również znaleźć bardziej szczegółowy opis sposobu wyznaczania współczynników aerodynamicznych przy użyciu metod CFD, gdyż to było bardzo istotnym elementem prowadzonych badań. Wyniki pracy prezentowane są w sposób przejrzysty, w postaci tabelarycznej i graficznej. Rozprawę kończy rzeczowe podsumowanie.

Do najważniejszych osiągnięć Doktoranta należy zaliczyć:

- opracowanie programu komputerowego do analizy danych radarowych;
- określenie współczynników aerodynamicznych z wykorzystaniem oprogramowania CFD;
- opracowanie programu komputerowego do symulacji lotu pocisków moździerzowych.

Doktorant wykazał się wiedzą z zakresu programowania, tworzenia modeli bryłowych i metod numerycznych mechaniki płynów. Należy podkreślić, że przedstawione w pracy wyniki badań wymagały dużego nakładu pracy i czasu. Prowadzone przez Doktoranta badania wykorzystywane były w procesie projektowania konstrukcji pocisków, w ramach programu RAK-AMUNICJA. Opracowany pocisk moździerzowy w wariacie 3 osiągnął donośność powyżej 10 km, dla prędkości początkowej 500 m/s, co jest niespotykane w znanych konstrukcjach tego typu. Podsumowując, całość rozprawy oceniam pozytywnie.

## Uwagi szczegółowe

Do najważniejszych uwag szczegółowych zaliczam następujące:

1. Pod względem redakcyjnym rozprawa napisana dość starannie. Jako drobne błędy edytorskie należy wskazać pozostawianie przyimków i spójników na końcu zdania, czy też rozpoczynanie zdania z wielkiej litery przy wypunktowaniu, czy błąd w postaci nałożenia się znaków (np. 4 akapit w podrozdziale 1.2.).
2. Występują nieliczne błędy gramatyczne np. str. 26 „...na wszystkich filmach *widoczna* jest wzrost kąta pochylenia....” oraz błędy stylistyczne, np. „Wytworzone zostały macierze...” powinno być wyznaczone lub obliczone; „...problemem jest udokładnienie...” powinno być zwiększenie dokładności.
3. W pracy analizowany jest pocisk 120 mm, zatem czy celowym było analizowanie, jak sam autor pisze, pocisków innego typu (str. 27, rysunki 2-6 do 2-8).
4. Brak jakichkolwiek informacji, przy jakich parametrach kamery nagrywane były strzelania pociskami moździerzowymi, w trakcie badań poligonowych.
5. Str.17, „ opis budowy.....znajduje się we wniosku patentowym [8]”. Pozycja [8] w spisie to nie jest wniosek patentowy. Błąd ten i temu podobne, wynikają z faktu, że w całym tekście rozprawy Autor błędnie powołuje się na pozycje przytoczone w spisie bibliografii. Ponadto literatura sformatowana nieprawidłowo.
6. Autor nie powołuje się w tekście na pozycje 31-34.
7. Str. 31, „Problem ten jest większy.....przeprowadzonych w innych warunkach”. O jaki warunki chodziło Autorowi?
8. Zgodnie z pozycją 4 literatury poprawność wzoru 2.13 oraz 2.17 budzi wątpliwości.
9. Str. 36, „ w celu porównania różnic pomiędzy otrzymanych wyników z prawami oporu powietrza...”. W tym miejscu należało chociaż powołać się na odpowiednie pozycje literatury, w której można znaleźć te prawa.
10. Czy Doktorant sam opracował konstrukcje przedstawionych wariantów pocisków, czy pracował w zespole?
11. Czy prowadzone były analizy dokładności metod CFD? Czym podyktowane było zastosowanie modelu opartego na gęstości? Czy oprogramowanie ANSYS Fluent można zastosować do wyznaczenia współczynników aerodynamicznych dla pocisków przeciwlotniczych kierowanych?
12. Z jakim krokiem dyskretyzacji prowadzone były symulacje komputerowe?

13. Str. 35, „Na podstawie danych radarowych za pomocą programu opisanego w punkcie w punkcie 3.2.3....”. W tym punkcie zamieszczone są wyniki badań dla pocisku wariant 2, a nie opis programu.
14. Str. 56 i 57, Dlaczego w tabeli 3.2 i na rysunku 3-5 pokazano wyniki dla 7 strzałów, podczas gdy śledzonych było 8 pocisków?
15. Dlaczego wybrano model szósty ładunku miotającego, str.59?
16. Dlaczego tylko dla pocisku wariant 3 naboje były termostатовane?

Powyższe uwagi nie obniżają wartości merytorycznej rozprawy. Praca ma charakter teoretyczno-doświadczalny i potencjał aplikacyjny. Doktorant wykazał się wiedzą zakresu budowy i eksploatacji maszyn, mechaniki, modelowania układów, programowania i metod numerycznych. Podjął się rozwiązania aktualnego problemu naukowego, a sformułowany cel główny pracy został osiągnięty.

#### **4. Ocena końcowa rozprawy**

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Tomasza Merdy dotyczy aktualnego zagadnienia badawczego, związanego z balistyką zewnętrzną naddźwiękowych pocisków moździerzowych. Doktorant wykazał się odpowiednią wiedzą i umiejętnościami prowadzenia badań naukowych i interpretacji wyników. Problematyka rozprawy mieści się w dyscyplinie *budowa i eksploatacja maszyn*.

Na podstawie przedstawionej opinii stwierdzam, że rozprawa doktorska mgra inż. Tomasza Merdy pt. „Modelowanie i badanie parametrów balistyki zewnętrznej naddźwiękowych pocisków moździerzowych” spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez aktualnie obowiązującą Ustawę z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2003 r. Nr 65 poz. 595 z późn. zm.) i **wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.**