



## Wpływ urządzenia wylotowego lufy na przyrost prędkości pocisku w okresie balistyki przejściowej

Marta CZYŻEWSKA<sup>\*</sup>, Radosław TRĘBIŃSKI

*Institut Techniki Uzbrojenia, Wydział Mechatroniki i Lotnictwa,  
Wojskowa Akademia Techniczna, ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa  
<sup>\*</sup>autor korespondencyjny, e-mail: mczyzewska@wat.edu.pl*

Artykuł wpłynął do redakcji 02.07.2014. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano 18.12.2014

DOI: 10.5604/20815891.1157779

**Streszczenie.** Praca stanowi kolejny etap badania balistyki przejściowej układów balistycznych. We wcześniejszych pracach przeprowadzone zostały badania balistyki przejściowej układów balistycznych, których lufy nie są wyposażone w urządzenie wylotowe. W pracy przedstawiono wyniki analizy numerycznej wpływu urządzenia wylotowego na balistykę przejściową armaty 35 mm. Przedstawione zostały wyniki numerycznego modelowania wystrzału 35 × 228 mm naboju z różnymi pociskami z lufy bez urządzenia wylotowego oraz wyposażonej w urządzenie wylotowe. Modelowanie przeprowadzono za pomocą programu ANSYS FLUENT. Wyznaczono zmiany prędkości pocisku, a także ciśnienia i prędkości gazów w lufie i poza lufą. Wyniki symulacji wskazują, że obecność urządzenia wylotowego nie wpływa na przyrost prędkości pocisku w okresie balistyki przejściowej w przypadku pocisku ćwiczebnego. Natomiast w przypadku pocisku podkalibrowego przyrost prędkości pocisku po wylocie z lufy jest mniejszy w przypadku, gdy na lufie zamontowane jest urządzenie wylotowe. Uzyskane wyniki badań zostaną wykorzystane do dalszych badań związanych z modernizacją 35 mm armaty morskiej.

**Słowa kluczowe:** mechanika, balistyka przejściowa, urządzenie wylotowe

## 1. WSTĘP

W przejściowym okresie strzału, oddzielającym okres balistyki wewnętrznej, czyli ruch pocisku w lufie, oraz okres balistyki zewnętrznej, gdy pocisk przemieszcza się w niezaburzonym ośrodku, zachodzą zjawiska mające wpływ na ruch pocisku. Zjawiska, które opisuje balistyka przejściowa rozpoczynają się od chwili, gdy do wylotu lufy dotrze czoło fali uderzeniowej, powstającej wewnątrz lufy w powietrzu sprężanym ruchem pocisku. Wpływ procesów przejściowych ustaje, gdy pocisk opuści obszar zaburzony wpływem gazów prochowych.

Zjawiska balistyki przejściowej w otoczeniu wylotu lufy są bardzo złożone, co stanowi o trudności rozpoznania ich postaci oraz specyfiki ich wpływu na ruch pocisku w tym okresie. W obrazie falowym procesu wyróżnia się dwie fale poddmuchu oraz oddziaływania pomiędzy nimi. Pierwszy poddmuch powstaje w wyniku ruchu prekursora przepływu przed pociskiem, powstałego w powietrzu ściskanym przez poruszający się pocisk. Drugi poddmuch generuje się w chwili, gdy pocisk opuści wylot lufy i ma miejsce wypływ gazów prochowych.

Zjawiska okresu przejściowego są wnikliwie opisane w monografii [1]. Próby matematycznego modelowania tych zjawisk podjęto w pracach [2-9]. Uwaga autorów tych prac skupiona była na odtworzeniu procesów gazodynamicznych zachodzących w pobliżu lufy w okresie balistyki przejściowej. W najnowszej pracy, podejmującej tę tematykę [9], okres przejściowy modelowany jest pod kątem procesu rozcalania sabotu. Autorzy wykorzystują własny trójwymiarowy kod numeryczny FREIN, nad którym – jak przyznają – pracowali przez wiele lat (patrz praca tych autorów z roku 1998 – [4]). W żadnej ze wspomnianych prac nie analizowano wielkości przyrostu prędkości pocisku w okresie powylotowym. Jedyną pracą w obszarze modelowania, która poświęcona jest oszacowaniu tego przyrostu, jest praca autorów niniejszego artykułu [10].

Poprzednie numeryczne badania zjawisk balistyki przejściowej [10] wykazały, że przyrost prędkości pocisku po wylocie z lufy jest relatywnie niewielki. W prowadzonych dotychczas symulacjach nie brano pod uwagę obecności na wylocie lufy hamulca wylotowego bądź innego urządzenia. W artykule przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych okresu przejściowego, uwzględniające obecność urządzenia wylotowego. Podjęto również próbę zweryfikowania, jak rodzaj pocisku, przy tym samym kalibrze, wpływa na przyrost prędkości pocisku w okresie przejściowym.

Symulację komputerową przeprowadzono dla układu balistycznego kalibru 35 mm, dla strzelania pociskiem ćwiczebnym TP-T oraz podkalibrowym FAPDS-T. Wyniki modelowania opisane w artykule stanowią jeden z etapów badań dotyczących modernizacji 35 mm armaty morskiej KDA.

## 2. ZAŁOŻENIA MODELU

Model fizyczny procesu, przyjmowane w modelu założenia upraszczające, warunki graniczne oraz siatka obliczeniowa wykorzystywane do modelowania ruchu pocisku w lufie (bez urządzenia wylotowego) oraz poza nią przedstawione zostały w pracy [10]. W pracy tej przedstawiono również szczegóły dotyczące modelowania zjawisk balistyki przejściowej.

### 2.1. Modelowanie ruchu pocisku podkalibrowego FAPDS-T

Do obliczeń numerycznych ruchu pocisku podkalibrowego wybrano pocisk FAPDS-T. Masa, geometria pocisku oraz sabotu zostały zachowane. Nie uwzględniono natomiast rozcalania sabotu po wylocie pocisku z lufy. Wyniki prowadzonych obliczeń wykazały, że wpływ ciśnienia gazów prochowych na zmianę prędkości pocisku po wylocie z lufy ma miejsce na bardzo krótkim odcinku, rzędu kilku kalibrów. W przypadku pocisku ćwiczebnego TP-T przyrost prędkości pocisku następuje na drodze około 2 kalibrów. Dlatego też, podczas modelowania ruchu pocisku podkalibrowego przyjmowano, że w czasie oddziaływania na pocisk gazów wypływających z lufy, rdzeń porusza się wraz z sabotem. Na tak krótkim odcinku rozcalenie sabotu będzie niewielkie, natomiast rozbudowa modelu i wydłużenie czasu obliczeń nie wniosłyby znacząco nowych elementów do badanych procesów balistyki przejściowej.

### 2.2. Modelowanie z uwzględnieniem urządzenia wylotowego

Modernizowana 35 mm armata KDA ma na lufie zamontowane urządzenie wylotowe, pełniące m.in. funkcję hamulca wylotowego. Jego obecność wpływa na obraz falowy zjawisk zachodzących w okolicy wylotu lufy. W dostępnej literaturze brakuje natomiast informacji określających charakter wpływu obecności urządzenia wylotowego na zmiany prędkości pocisku w okresie powylotowym. W związku z tym, w ramach badań dotyczących balistyki przejściowej dla układu kalibru 35 mm, podjęta została próba określenia, czy w sytuacji, gdy na wylocie lufy znajduje się urządzenie wylotowe, przyrost prędkości pocisku jest taki sam jak w przypadku, gdy nie ma tego urządzenia.

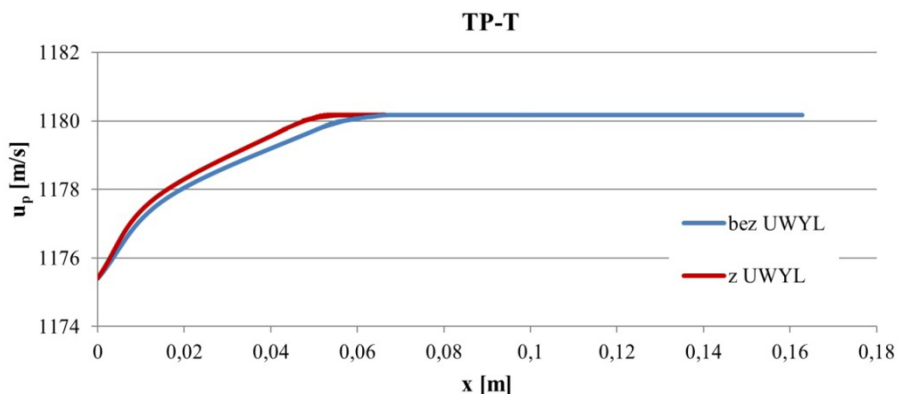
Podstawowe procesy okresu przejściowego, przepływ gazodynamiczny, wpływ gazów prochowych i rozwój obłoku sprężanego powietrza, ruch pocisku w przypadku układów bez urządzenia wylotowego charakteryzują się symetrią osiowąsymetryczną. Dominujące właściwości procesów balistyki przejściowej, złożoność obliczeniowa modeli trójwymiarowych, skłoniły autorów do podjęcia modelowania wpływu gazów z lufy z urządzeniem wylotowym w układzie dwuwymiarowym.

Projektowane urządzenie wylotowe, które docelowo ma być zamontowane na lufie armaty KDA, nie ma geometrii osiowosymetrycznej. Urządzenie wylotowe posiada 6 okien wylotowych rozmieszczonych w dwóch rzędach po 3 okna co 120 stopni. W celu adaptacji geometrii urządzenia do modelu 2D zmieniono położenie okien wylotowych tak, aby można było przyjąć osiową symetrię ich rozkładu. Odległość okien od przekroju wylotowego lufy oraz ich szerokość zostały zachowane. Założona geometria urządzenia wylotowego widoczna jest na rysunku 5. Przyjęte jej uproszczenie oznacza, że na proces wylotu gazów prochowych przez okna urządzenia wylotowego nałożone zostały słabsze ograniczenia niż w rzeczywistym urządzeniu. Można zatem oczekiwać, że model teoretyczny zawyża efekty wpływu obecności urządzenia wylotowego.

### 3. WYNIKI MODELOWANIA

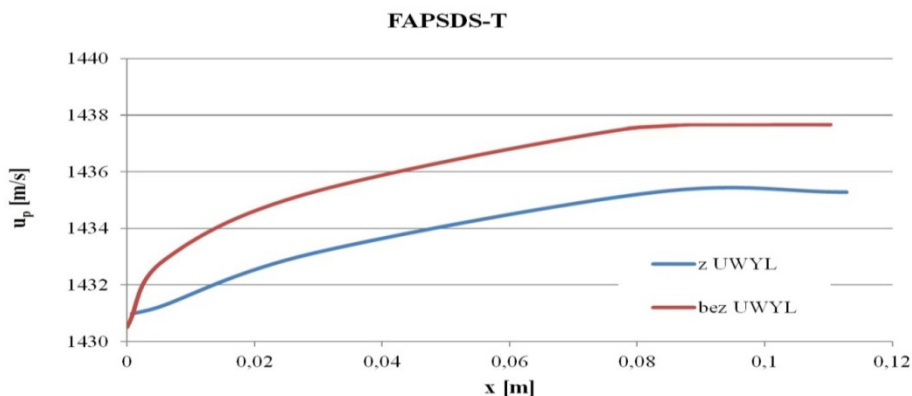
W wyniku modelowania balistyki wewnętrznej dla 35 mm pocisku ćwiczebnego TP-T otrzymano prędkość wylotową pocisku wynoszącą 1175,4 m/s. Po wylocie pocisku z lufy prędkość wzrosła do wartości 1180,17 m/s. Przyrost prędkości wynosi w tym przypadku 0,41%. Taką samą wartość przyrostu uzyskano zarówno w przypadku lufy z urządzeniem wylotowym, jak i bez urządzenia. Przebiegi prędkości pocisku TP-T w funkcji drogi po opuszczeniu lufy w wariancie bez urządzenia wylotowego oraz z urządzeniem wylotowym przedstawiono na rysunku 1. Można zauważyć, że przyrost prędkości pocisku po opuszczeniu przewodu lufy następuje nieco wcześniej w przypadku, gdy na lufie jest zamocowane urządzenie wylotowe. Z wykresu przedstawionego na rysunku 1 wynika, że oddziaływanie wypływających gazów prochowych na dno pocisku ma miejsce na drodze równej około 1,7 kalibra w przypadku, gdy na lufie nie ma urządzenia wylotowego oraz 1,4 kalibra, gdy na lufie jest zamontowane urządzenie.

Natomiast w wyniku modelowania ruchu 35 mm pocisku podkalibrowego FAPSDS-T stwierdzono, że prędkość pocisku po wylocie z lufy bez urządzenia wylotowego wzrosła z wartości 1430,51 m/s do wartości 1437,66 m/s. Przyrost prędkości pocisku w okresie powylotowym wyniósł 0,5%. W przypadku pocisku z lufy z urządzeniem wylotowym prędkość pocisku wzrasta do wartości 1435,28 m/s, co odpowiada względnej zmianie prędkości wynoszącej 0,3%. Na rysunku 2 przedstawiono przebiegi prędkości pocisku FAPSDS-T w funkcji drogi po opuszczeniu lufy w konfiguracji bez urządzenia wylotowego oraz z urządzeniem wylotowym. W tym przypadku rozbieżność w wartościach przyrostu prędkości jest już znaczna. Gazy prochowe wpływają na zmianę prędkości pocisku po wylocie z lufy na drodze około 2,37 kalibra, zarówno w układzie z urządzeniem wylotowym, jak i bez niego.



Rys. 1. Przebieg prędkości pocisku ćwiczebnego TP-T po wylocie z lufy bez urządzenia wylotowego oraz z urządzeniem wylotowym

Fig. 1. Graph of TP-T projectile velocity after the exit of the barrel with and without the muzzle brake

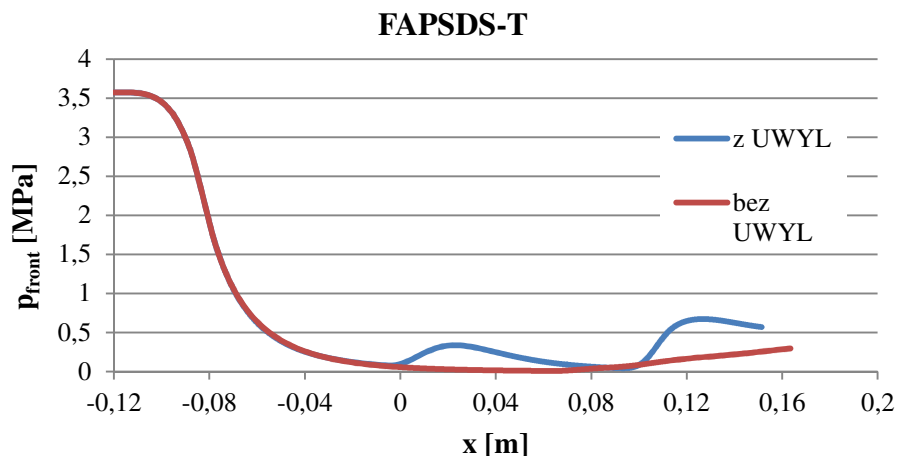


Rys. 2. Przebieg prędkości pocisku podkalibrowego FAPSDS-T po wylocie z lufy bez urządzenia wylotowego oraz z urządzeniem wylotowym

Fig. 2. Graph of FAPSDS-T projectile velocity after the exit of the barrel with and without the muzzle brake

Na rysunku 3 przedstawione zostały zmiany ciśnienia gazów przed pociskiem podkalibrowym FAPSDS-T od chwili, gdy czoło pocisku osiągnęło przekrój wylotu lufy do zakończenia okresu przejściowego. Rejestrowano ciśnienia zarówno w przypadku lufy wyposażonej w urządzenie wylotowe, jak i bez tego urządzenia. Punkt „0” na osi odciętych odpowiada przekrojowi wylotu lufy. Wpływ urządzenia wylotowego na wielkość ciśnienia przed pociskiem ujawnia się od chwili, gdy dno pocisku osiągnie przekrój wylotu lufy.

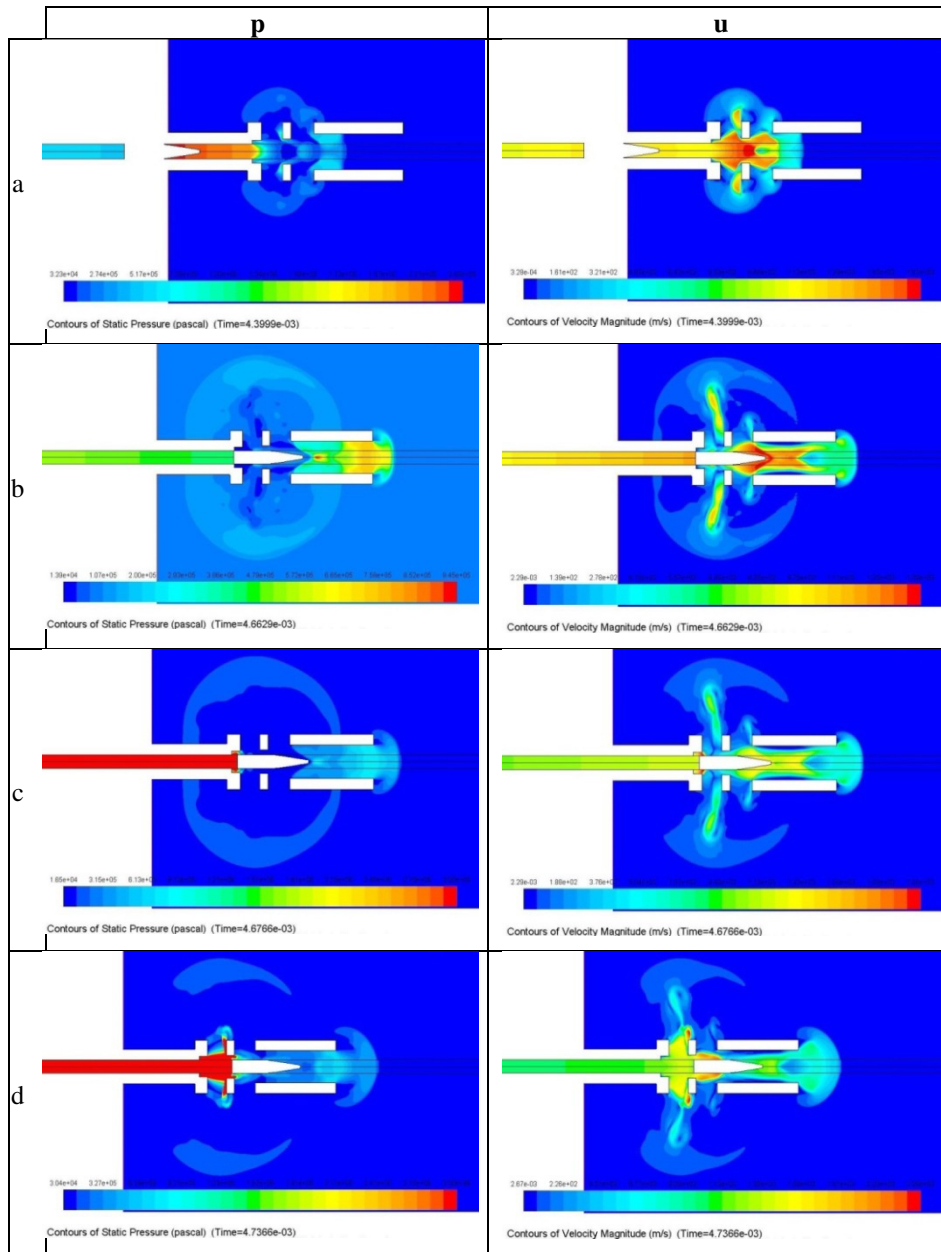
Większe wartości ciśnienia przed czołem pocisku obserwowane są w układzie lufy z urządzeniem wylotowym. Wzrosty ciśnienia na czole pocisku związane są z przechodzeniem pocisku przez kolejne okna wylotowe. Z porównania rysunków 2 i 3 wynika, że po przejściu przez pierwsze okno (dno pocisku w odległości około 0,08 m od wylotu lufy) prędkość pocisku nie ulega dalszym zmianom. W okresie gdy występuje drugi wzrost ciśnienia na czole pocisku, widoczny na wykresie 3, wpływ gazów prochowych z lufy i procesy ich oddziaływania z powietrzem i urządzeniem wylotowym nie wywierają już zatem wpływu na prędkość pocisku. W przypadku gdy lufa nie jest wyposażona w urządzenie wylotowe, ciśnienie przed pociskiem wzrasta w stopniu nieznacznym. Analogiczna sytuacja ma miejsce w przypadku pocisku ćwiczebnego TP-T.



Rys. 3. Wykres ciśnienia gazów przed pociskiem podkalibrowym FAPSDS-T w funkcji drogi od chwili, gdy czoło pocisku osiąga przekrój wylotu lufy do zakończenia okresu przejściowego

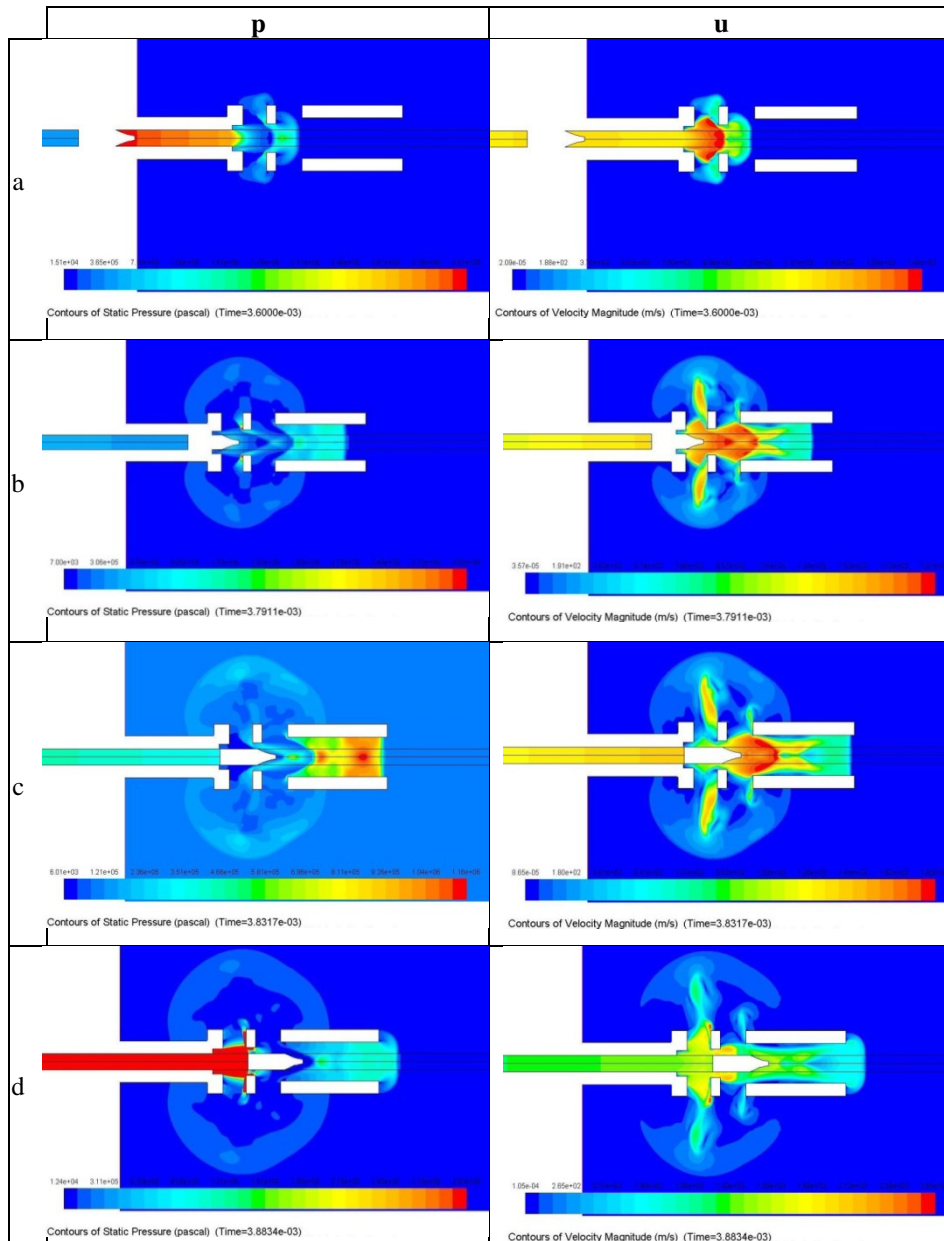
Fig. 3. Graph of powder gases pressure behind of FAPSDS-T projectile vs. displacement from time, when the front of the projectile reaches the muzzle to the end of the intermediate ballistics

Otrzymane z symulacji izoliny prędkości oraz ciśnienia gazów za pociskiem TP-T, a także powietrza wypychanego przez pocisk z przewodu lufy wyposażonej w urządzenie wylotowe dla wybranych kroków czasowych przedstawione zostały na rysunku 4. Czas, w którym dno pocisku osiągnęło przekrój wylotu lufy, został określony jako  $t = 0 \mu\text{s}$ . Rozkłady ciśnienia i prędkości gazów dla przypadku lufy bez urządzenia wylotowego przedstawione zostały w artykułach [2] i [6].



Rys. 4. Izolinie ciśnienia i prędkości gazów za pociskiem ćwiczebnym TP-T i gazów wypychanych przez pocisk z przewodu lufy w chwili: a)  $t = -263 \mu\text{s}$ , b)  $t = 0 \mu\text{s}$ , c)  $t = 13 \mu\text{s}$ , d)  $t = 73 \mu\text{s}$

Fig. 4. Isolines of gas pressure and gas velocity behind the TP-T projectile and gases pushed by projectile from the barrel at the time: a)  $t = -263 \mu\text{s}$ , b)  $t = 0 \mu\text{s}$ , c)  $t = 13 \mu\text{s}$ , d)  $t = 73 \mu\text{s}$



Rys. 5. Izolinie ciśnienia i prędkości gazów za pociskiem podkalibrowym FAPSDS-T i gazów wypychanych przez pocisk z przewodu lufy w chwili: a)  $t = -231 \mu\text{s}$ , b)  $t = -40 \mu\text{s}$ , c)  $t = 0 \mu\text{s}$ , d)  $t = 52 \mu\text{s}$

Fig. 5. Isolines of gas pressure and gas velocity behind the FAPSDS-T projectile and gases pushed by projectile from the barrel at the time: a)  $t = -231 \mu\text{s}$ , b)  $t = -40 \mu\text{s}$ , c)  $t = 0 \mu\text{s}$ , d)  $t = 52 \mu\text{s}$



Izolinie prędkości i ciśnienia gazów za pociskiem podkalibrowym FAPSDS-T oraz powietrza wypychanego przez pocisk z lufy z urządzeniem wylotowym dla wybranych kroków czasowych przedstawiono na rysunku 5. Czas, w którym dno pocisku osiągnęło przekrój wylotu lufy, został również określony jako  $t = 0 \mu\text{s}$ .

#### 4. PODSUMOWANIE

W pracy zostały przedstawione wyniki prac poświęconych badaniu wpływu okresu balistyki przejściowej na zmiany prędkości pocisku po opuszczeniu wylotu lufy. Rozpatrywano wpływ urządzenia wylotowego na wielkość i charakter tych zmian. Przeprowadzona została analiza numeryczna okresu przejściowego, określone zostały pola ciśnienia i prędkości wypływających gazów prochowych oraz powietrza, sprężanego wypływem gazów i ruchem pocisku. Przeprowadzono symulację numeryczną dla dwóch rodzajów pocisków, ćwiczebnego i podkalibrowego. W wyniku symulacji przeprowadzonych dla układu miotającego z pociskiem ćwiczebnym TP-T otrzymano wzrost prędkości pocisku po opuszczeniu wylotu lufy o około 0,41%. Porównanie wyników symulacji prowadzonych dla układów bez i z obecnością urządzenia wylotowego pozwala wnioskować, że obecność urządzenia nie wpływa w tym przypadku na wielkość przyrostu prędkości.

Wpływ urządzenia wylotowego na charakter zmian prędkości zaobserwowano natomiast podczas symulacji ruchu pocisku podkalibrowego FAPSDS-T. Przyrost prędkości pocisku podkalibrowego w układzie wyposażonym w urządzenie wylotowe był mniejszy o około 2,4 m/s w porównaniu z przypadkiem, gdy lufa nie była wyposażona w urządzenie wylotowe.

Geometria i wymiary urządzenia wylotowego opisywane były dwuwymiarowym modelem osiowosymetrycznym. Wyniki uzyskane z wykorzystaniem rozpatrywanego modelu dwuwymiarowego stanowią oszacowanie od góry wpływu urządzenia wylotowego na przyrost prędkości pocisku w okresie powylotowym. Można przewidywać, że w trójwymiarowym przypadku wartość przyrostu prędkości będzie bardziej zbliżona do wyniku uzyskanego dla przypadku bez obecności urządzenia wylotowego. Wynika to ze zwiększonej powierzchni okien wylotowych w przypadku uproszczenia do geometrii 2D. W celu uzyskania bardziej wiarygodnych wyników należy przedstawiony w dotychczasowych pracach model dostosować do obliczeń balistyki przejściowej w ujęciu trójwymiarowym.

Kolejnym etapem badania wpływu urządzenia wylotowego na zjawiska balistyki przejściowej powinno być przeprowadzenie dalszych obliczeń numerycznych dla zróżnicowanych układów balistycznych.

Badania te zamierza się prowadzić w celu określenia wpływu zjawisk balistyki przejściowej z uwzględnieniem obecności urządzenia wylotowego na zmianę prędkości pocisku dla układów miotających różnego kalibru.

*Artykuł prezentuje częściowe wyniki realizacji projektu rozwojowego nr O ROB 0046 03 001 dofinansowanego przez NCBR ze środków na naukę w latach 2012-2016.*

## LITERATURA

- [1] Klingenberg G., Heimerl J.M., Gun muzzle blast and flash, *Progress in Astronautics and Aeronautics*, vol. 139, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington, 1992.
- [2] Erdos J.I., Del Guidice P.D., Calculation of muzzle blast flowfields, *AIAA Journal*, 13(8), pp. 1048-1055, 1975.
- [3] Moretti G., A numerical analysis of muzzle blast precursor flow, *Computers and Fluids*, 10(1), pp. 51-86, 1982.
- [4] Cayzac R., Carette E., Alziary de Roquefort T., Vaglio C., Brossard J., Intermediate ballistic computations and validation, *Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Symposium on Ballistics*, Midrand, South Africa, vol. 2, pp. 1-8, 1998.
- [5] Jiang Z., Takayama K., Skews B.W., Wave interactions following the emergence of a supersonic projectile from a tube, *Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Symposium on Ballistics*, Midrand, South Africa, vol. 2, pp. 9-16, 1998.
- [6] Hudson M.K., Luchini C., Clutter J.K., Shyy W., The evaluation of computational fluid dynamics methods for design of muzzle blast suppressors for firearms, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 26(4), pp. 201-208, 2001.
- [7] Bin J., Kim M., Lee S., A numerical study on the generation of impulsive noise by complex flows discharging from a muzzle, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 75(8), pp. 964-991, 2008.
- [8] Jiang X., Chen Z., Fan B., Li H., Numerical simulation of blast flow fields induced by a high-speed projectile, *Shock Waves*, 18(3), pp. 205-212, 2008.
- [9] Cayzac R., Carette E., Alziary de Roquefort T., Renard F., Roux D., Balbo P., Patry J., Computational fluid dynamics and experimental validations of the direct coupling between interior, intermediate and exterior ballistics using the Euler equations, *Journal of Applied Mechanics*, 78(6), 061006-16, 2011.

- [10] Trębiński R., Czyżewska M., Estimation of projectile velocity increase in the intermediate ballistics period, *Central European Journal of Energetic Materials*, 1 (accepted for publication), 2015.

## **Effect of Muzzle Brake on Projectile Velocity Increase in the Intermediate Ballistics**

Marta CZYŻEWSKA, Radosław TRĘBIŃSKI

**Abstract.** The paper continues the authors' studies on the influence of intermediate ballistics phenomena on increase in the projectile velocity. In a consecutive stage of investigations, studies of the presence of the muzzle brake on acceleration of the projectile in the transitional period are carried out. In the paper, the results of numerical study of the influence of presence and shape of muzzle brake on the projectile velocity increase in the intermediate ballistics period are presented. Numerical simulations of firing of  $35 \times 228$  mm cartridge, with various bullets from the barrel with and without muzzle brake have been performed using the ANSYS FLUENT code. Changes of projectile velocity and changes of pressure and gas velocity inside and outside the barrel were calculated. The simulations indicate that presence of the muzzle brake only in merely degree affects increase in the projectile velocity in the case of the practise missile, while in the case of FAPSDST projectile, the increment of projectile velocity after the output of the barrel is lower when the muzzle brake is mounted on the muzzle. The results will be used in further research related to the modernization of 35-mm naval cannon.

**Keywords:** mechanics, intermediate ballistics, muzzle brake

