



Symulacja ruchu pocisku w pobliżu wylotu lufy*

Marta CZYŻEWSKA, Radosław TRĘBIŃSKI

*Institut Techniki Uzbrojenia, Wydział Mechatroniki i Lotnictwa,
Wojskowa Akademia Techniczna,
ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa*

Streszczenie. W artykule przedstawione zostały wyniki symulacji ruchu pocisku w lufie oraz po wylocie z lufy. Obliczenia numeryczne przeprowadzono w programie ANSYS Fluent 12.1 dla lufy kalibru 30 mm oraz poruszającego się w niej pocisku amunicji średniokalibrowej 30 × 173 mm TP-T. Policzone zostały zmiany prędkości pocisku oraz ciśnienia i prędkości gazów w lufie i poza lufą. Wyniki symulacji wskazują, że przyrost prędkości w okresie balistyki przejściowej może być istotny.

Słowa kluczowe: mechanika, balistyka przejściowa, symulacja

1. WSTĘP

Okres zjawiska strzału rozdzielający ruch pocisku w lufie oraz ruch pocisku w atmosferze niezaburzonej wypływem gazów nazywamy balistyką przejściową. Zjawiska tego okresu są szeroko opisane w monografiach [1] i [2]. Próbowano również modelować matematycznie zjawiska tego okresu ([3]-[5]), jednak tylko pod kątem osłabienia fali podmuchowej oraz błysku, który towarzyszy wypływowi gazów prochowych z lufy. Jednak brakuje w literaturze informacji o wpływie zjawisk balistyki przejściowej na ruch pocisku. Informacja ta może być bardzo przydatna przy przewidywaniu zmian prędkości pocisku w tym okresie.

* Artykuł został opracowany na podstawie referatu prezentowanego podczas IX Międzynarodowej Konferencji Uzbrojeniowej nt. „Naukowe aspekty techniki uzbrojenia i bezpieczeństwa”, Pułtusk, 25-28 września 2012 r.

Wiedza o zmianach prędkości pocisku na etapie balistyki przejściowej może rozwiązać problem ściślejszego przystosowania rezultatów balistyki wewnętrznej jako danych początkowych do wykorzystania w systemach kierowania ogniem.

W balistyce przejściowej można wyróżnić trzy etapy. Pierwszy etap ma początek w chwili dojścia do wylotu z lufy fali uderzeniowej, która generuje się w powietrzu wypełniającym lufę, a kończy, gdy czoło pocisku dotrze do wylotu lufy.

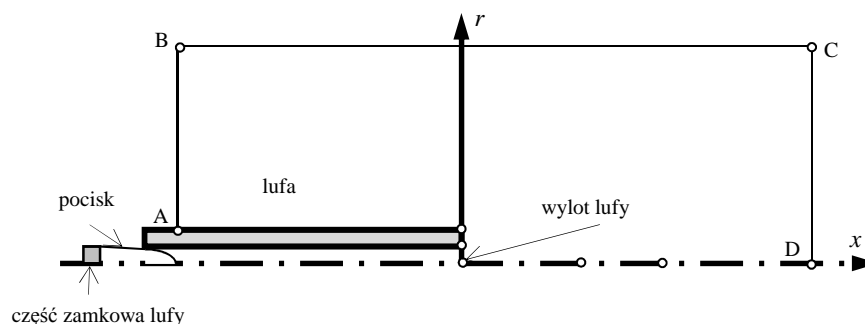
W drugim etapie wylot gazów prochowych jest blokowany przez pocisk do chwili, gdy dno pocisku osiągnie przekrój wylotu lufy. W trzecim etapie następuje wypływ gazów prochowych z lufy. Szczegółowy opis zjawisk balistyki przejściowej znajduje się w artykule [6]. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki modelowania trzech etapów balistyki przejściowej przy przyjęciu pewnych uproszczeń dotyczących etapu balistyki wewnętrznej.

2. SFORMUŁOWANIE MODELU

2.1. Założenia upraszczające

W celu uproszczenia modelu obliczeniowego przyjęto następujące założenia:

1. pola parametrów ruchu oraz stanu powietrza i gazów prochowych zależą jedynie od czasu oraz zmiennych przestrzennych: osiowej x i radialnej r , czyli przepływ jest osiowosymetryczny (rys. 1),
2. fale, które są wynikiem wypływu gazów, nie docierają do granic obszaru **AB**, **BC** i **CD**; na granicach zadano wartości parametrów powietrza odpowiadające warunkom normalnym: $p_0 = 1013,25$ hPa, $T_0 = 300$ K,
3. uwzględniany jest jedynie transport konwekcyjny i falowy; równania je opisujące oraz sformułowanie warunków granicznych przedstawione zostały w artykule [6],
4. powietrze i gazy prochowe traktowane są jako gazy doskonałe o stałym cieple właściwym,
5. proch uległ całkowitemu spaleniowi przed uruchomieniem pocisku.



Rys. 1. Schemat wykorzystany do modelowania przepływu gazodynamicznego w okresie balistyki przejściowej

Fig. 1. Diagram used to model the gasdynamic flow during the intermediate ballistics

2.2. Charakterystyka symulacji

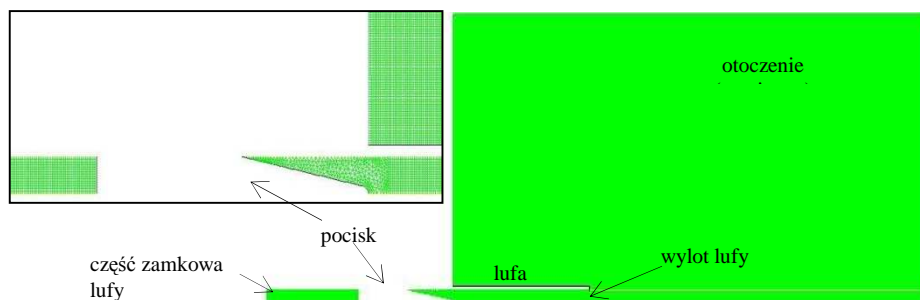
2.2.1. Model

Pocisk ważący 0,366 kg jest początkowo w spoczynku wewnątrz 30 mm lufy. Gaz w części zamkowej lufy powstały z całkowitego spalania prochu dla czasu $t = 0$ ma ciśnienie 3600 [MPa] i temperaturę 3300 [K]. Powietrze w lufie przed pociskiem i na zewnątrz lufy znajduje się w warunkach normalnych.

Uwzględniany jest rzeczywisty kształt pocisku. Pomijane są opory ruchu pocisku związane z wcinaniem się pocisku w gwint lufy i tarciami o ścianki lufy oraz ruchem obrotowym pocisku. Uwzględniane są tylko siły wywierane na pocisk przez gazy prochowe i powietrze przed pociskiem.

2.2.2. Siatka obliczeniowa

Obliczenia numeryczne przeprowadzono w programie ANSYS Fluent 12.1. W oparciu o schemat z rysunku 1 w module Design Modeler została wygenerowana geometria 2D pocisku i obszaru, do którego następuje wypływ gazów. W następnej kolejności przy wykorzystaniu modułu Meshing wygenerowano strukturalną siatkę obliczeniową (rys. 2) o wymiarach komórek $1,0 \times 1,0$ mm. Wielkość siatki obliczeniowej została dobrana, bazując na doświadczeniach poprzednich obliczeń numerycznych opisanych w poprzednim artykule [7].



Rys. 2. Siatka obliczeniowa

Fig. 2. Computing mesh

Siatka obliczeniowa została podzielona na dwa obszary – stacjonarny i ruchomy. Ruchomą siatkę otrzymano, wykorzystując opcję „Layering”. W obszarze dynamicznym siatka przemieszcza się w prawo z prędkością pocisku, natomiast w obszarze stacjonarnym komórki nie przemieszczają się. W tym samym czasie komórki są tworzone na dnie łuski pocisku, a destrukcji ulegają komórki na prawej granicy obszaru obliczeniowego.

2.2.3. Warunki graniczne

Na granicy obszaru, do którego wypływają gazy, zostały zadane warunki normalne ($p_0 = 1013,25$ hPa, $T_0 = 300$ K), dodatkowo wykorzystano opcję nieodbijania fal (ang. *non-reflecting boundary*). Standardowe brzegowe warunki ciśnienia zadawane na granicy sztucznie ograniczonych domen powodują odbicie wychodzących fal. W konsekwencji wewnątrz domeny znajdują się sztucznie powstałe fale. Wykorzystanie nieodbiciowych warunków brzegowych zapewnia szczególne traktowanie granic domen w celu zwalczania tych fałszywych odbić fal. Na dnie łuski oraz wewnętrznej i zewnętrznej powierzchni lufy zadaje się warunek typu sztywnej ścianki z poślizgiem.

2.3. Symulacja

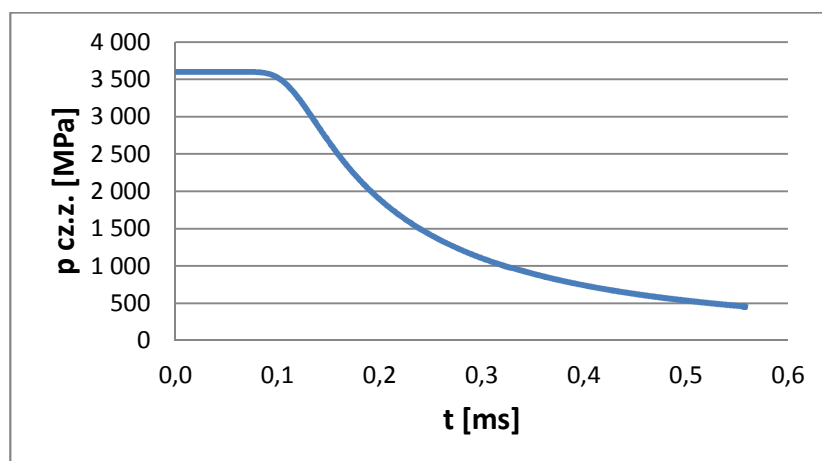
Modelowane zjawiska balistyki przejściowej są silnie nieustalone i zachodzą w nich szybkozmienne procesy, dlatego w programie do symulacji przyjęto niejawną schemat różnicowy i model nieustalony. Wykorzystano typ solvera Density-Based, w którym równania ciągłości, pędu i energii oraz transportu cząstek są rozwiązywane jednocześnie. Równania nieliniowe są zlinearyzowane poprzez utworzony układ równań dla zmiennych niezależnych dla każdej komórki obliczeniowej. W modelu nie uwzględniano lepkości płynu (inviscid), tym samym nie rozpatrywano turbulencji przepływu.

Uzasadnienie takich założeń oparte jest na poprzednim etapie modelowania omówionym w poprzednim artykule [7]. Dodatkowo ze względu na obecność ruchomej siatki, do dyskretyzacji przepływu wykorzystano schemat różnicowy pierwszego rzędu „pod prąd” (ang. *first-order upwind*) oraz standardowe wartości współczynników relaksacji w celu ustabilizowania procesu obliczeniowego.

3. WYNIKI OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH

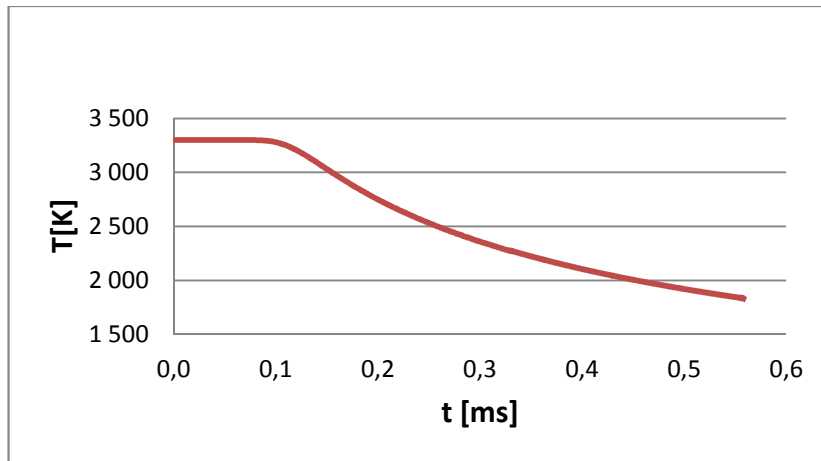
Symulacja ruchu pocisku w lufie została przeprowadzona z krokiem czasowym $1,0 \mu\text{s}$ oraz liczbą Couranta wynoszącą 100. Ten etap symulacji kończył się w momencie, gdy dno pocisku znalazło się na przekroju wylotu lufy. Następny etap symulacji, czyli wypływ gazów prochowych przeprowadzony był z krokiem czasowym $0,1 \mu\text{s}$. Dla każdego kroku czasowego następowała szybka zbieżność wyników na poziomie kilkunastu iteracji. Residua dla prędkości osiowej, ciągłości i energii bardzo dobrze zbiegały się w czasie. Prędkość radialna była mniej wrażliwa z powodu jednowymiarowego przepływu.

Na rysunku 3 przedstawiony jest przebieg ciśnienia w części zamkowej lufy. Można zauważyć gwałtowny spadek ciśnienia, co jest zobrazowaniem gwałtownego rozprężania gazów prochowych. Podobne zachowanie można zaobserwować na rysunku 4 przedstawiającym przebieg temperatury w tej części lufy.



Rys. 3. Wykres zmian średniego ciśnienia wywieranego na część zamkową lufy w czasie

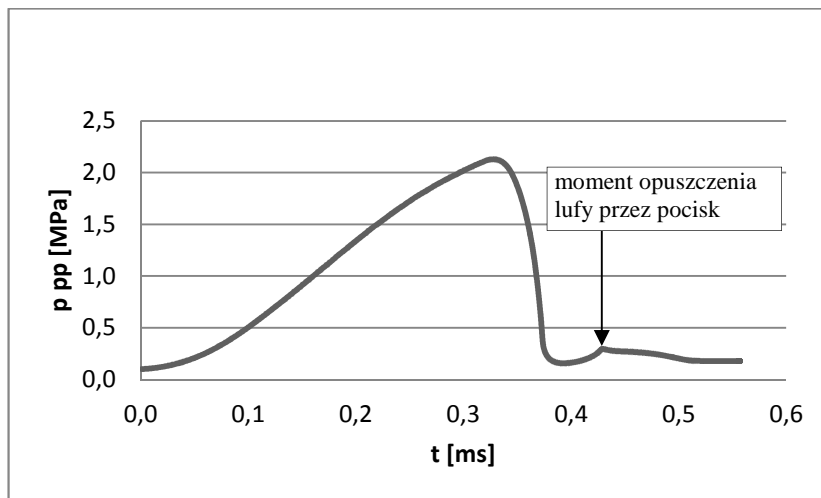
Fig. 3. Graph of average pressure exerted on the breech in time



Rys. 4. Wykres zmian średniej temperatury gazu w części zamkowej lufy w czasie

Fig. 4. Graph of average temperature of gas exerted on the breech in time

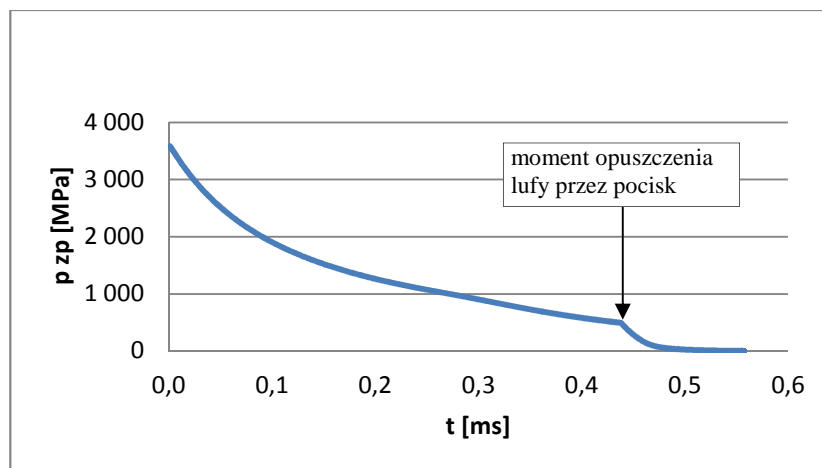
Należy zaznaczyć, że przebiegi ciśnienia i temperatury nie odpowiadają rzeczywistym przebiegom, ponieważ nie uwzględniają stopniowego spalania ładunku prochowego w trakcie ruchu pocisku. Jednakże celem modelowania była analiza efektów na wylocie lufy. Zmiany ciśnienia przed pociskiem przedstawione są na rysunku 5.



Rys. 5. Wykres średniego ciśnienia wywieranego na czoło pocisku

Fig. 5. Graph of average pressure exerted on the front of projectile

W wyniku ruchu pocisku powietrze przed nim jest ściskane, przez co następuje wzrost ciśnienia. Natomiast widoczny na wykresie spadek ciśnienia jest wynikiem dotarcia do pocisku zaburzeń rozrzedzeniowych generowanych w momencie, gdy fala uderzeniowa wytwarzana ruchem pocisku w lufie dociera do wylotu lufy. Widoczny na wykresie wzrost ciśnienia w okolicy 0,00045 s odpowiada momentowi przebicia dysku Macha przez pocisk. Dalej ciśnienie spada, aby ustalić się na poziomie ok. 0,25 MPa.



Rys. 6. Wykres średniego ciśnienia wywieranego na dno pocisku

Fig. 6. Graph of average pressure exerted on the base of the projectile

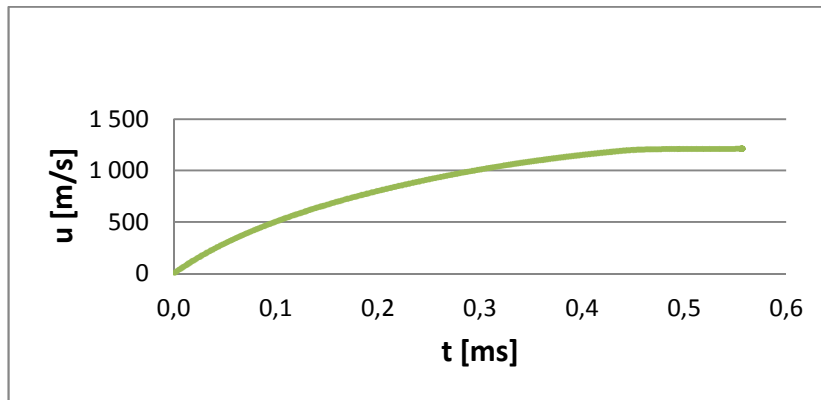
Na rysunku 6 przedstawiony jest wykres zmian średniego ciśnienia wywieranego na dno pocisku. Załamanie na krzywej odpowiada momentowi opuszczenia lufy przez pocisk. Jest ono spowodowane gwałtownym rozprężaniem się gazów prochowych w otoczenie. Istotnym wnioskiem z punktu widzenia celu modelowania jest stwierdzenie, że jeszcze przez około 0,1 ms po wylocie z lufy pocisk jest napędzany ciśnieniem gazów prochowych.

Przebieg prędkości pocisku w czasie przedstawiony jest na rysunku 7. Na rysunku 8 pokazano fragment tego wykresu, na którym lepiej widoczne są zmiany prędkości pocisku po wylocie z lufy.

Na wykresie widać wzrost prędkości z wartości 1183 [m/s] do wartości 1211 [m/s]. Następnie prędkość powoli się ustala na wartości 1211 [m/s]. W okresie balistyki przejściowej ma zatem miejsce ok. 2,4% przyrost prędkości pocisku.

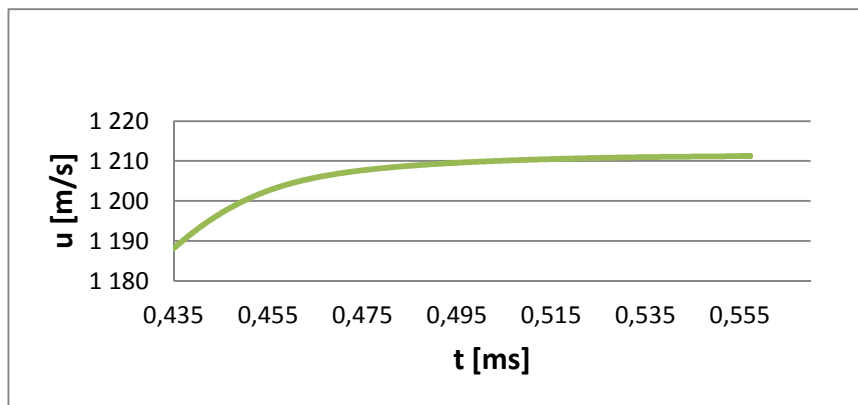
Wynik ten potwierdza konieczność prowadzenia analizy procesów balistyki przejściowej w celu oszacowania rzeczywistej prędkości pocisku, potrzebnej dla analiz balistyki zewnętrznej.

Wzrost prędkości pocisku już po opuszczeniu wylotu lufy przekłada się na błąd podczas implementowania wyników obliczeń balistyki wewnętrznej w systemach kierowania ogniem. Konsekwencje błędnego przyjęcia wartości prędkości opisano w artykule [6].



Rys. 7. Wykres zmian prędkości pocisku w czasie

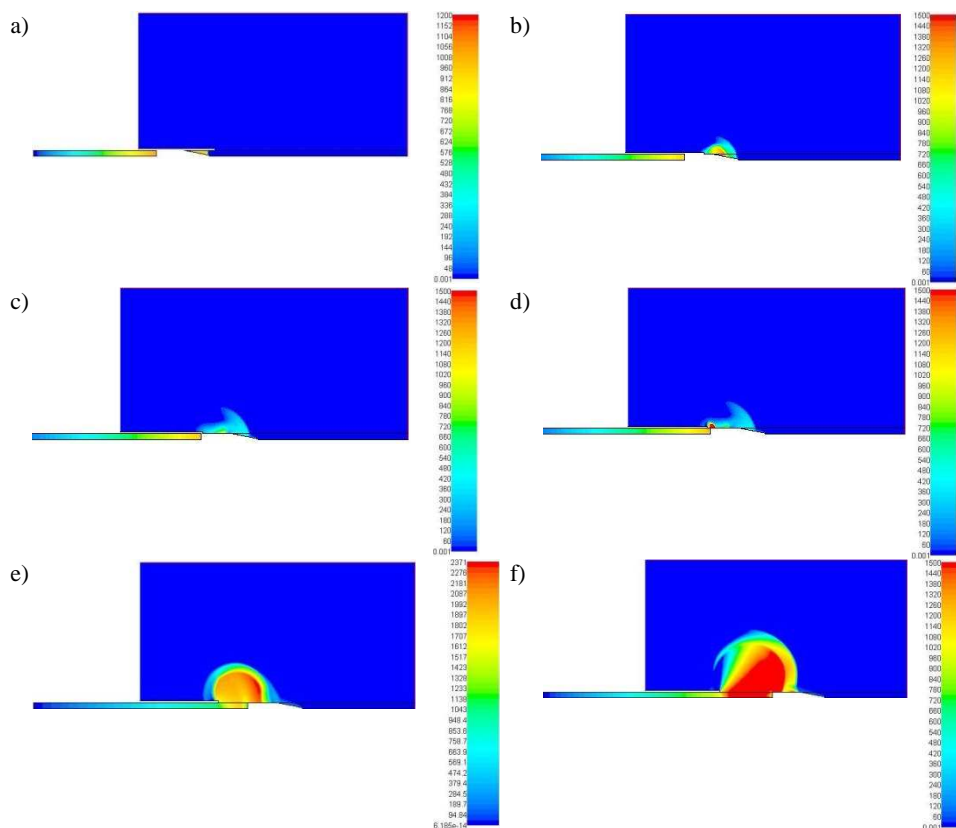
Fig. 7. Projectile velocity changes in time



Rys. 8. Wykres zmian prędkości pocisku w czasie dla okresu bezpośrednio przed opuszczeniem lufy i po jej opuszczeniu

Fig. 8. Projectile velocity changes in time for the period immediately before leaving the barrel and after leaving

Wyniki modelowania potwierdziły, że przepływ gazodynamiczny dla okresu balistyki przejściowej jest bardzo złożony. Ilustrują go otrzymane z symulacji izoliny prędkości gazów za pociskiem oraz powietrza wypchanego przez pocisk z przewodu lufy dla wybranych kroków czasowych przedstawione na rysunku 9.



Rys. 9. Izolinie prędkości gazów za pociskiem i gazów wypychanych przez pocisk z przewodu lufy w czasie: a) $t = 0,3$ ms, b) $t = 0,4$ ms, c) $t = 0,435$ ms, d) $t = 0,445$ ms, e) $t = 0,5$ ms, f) $t = 0,555$ ms

Fig. 9. Isolines of gas velocity behind the projectile and gases pushed by projectile from the barrel at the time: a) $t = 0,3$ ms, b) $t = 0,4$ ms, c) $t = 0,435$ ms, d) $t = 0,445$ ms, e) $t = 0,5$ ms, f) $t = 0,555$ ms

Przypadki *a-c* na rysunku 9 ilustrują strukturę prekursora przepływu, gdy gazy prochowe jeszcze nie wydostają się z lufy. Na rysunku 9 *d-f* widoczny jest przepływ formujący się na skutek wypływu gazów z lufy. Wytworzona przez niego fala uderzeniowa wzmacnia pierwotną falę podmuchową i dogania czoło pocisku. Dopiero po przebiciu przez pocisk frontu tej fali kończy się okres balistyki przejściowej, a zaczyna się okres balistyki zewnętrznej.

4. WNIOSKI

W pracy przedstawiono wyniki prac nad modelem teoretycznym, pozwalającym ocenić zmiany prędkości pocisku w etapie balistyki przejściowej. Symulacja potwierdziła, że prędkość pocisku tuż po opuszczeniu wylotu lufy wzrasta, zatem przyjęcie prędkości wylotowej jako prędkości początkowej w okresie balistyki zewnętrznej jest błędne. Pozostaje jeszcze kwestia ilościowego oszacowania wzrostu prędkości pocisku.

Wyniki pracy stanowią kolejny etap w budowie modelu uwzględniającego jednocześnie etap balistyki wewnętrznej i balistyki przejściowej. Przetestowana została w szczególności koncepcja wykorzystania idei ruchomej siatki w części obszaru obliczeniowego przylegającego z obu stron do pocisku. Potwierdzono przypuszczenie, że w okresie balistyki przejściowej prędkość pocisku może istotnie wzrastać. W kolejnym etapie pracy podjęta zostanie próba uwzględnienia w modelu stopniowego spalania się ładunku prochowego w trakcie ruchu pocisku w lufie oraz uwzględnienia rzeczywistych właściwości termodynamicznych gazów prochowych. Celem będzie zbliżenie wyników modelowania do wyników eksperymentalnych.

Artykuł zawiera wyniki pracy zrealizowanej jako część projektu badawczego nr 0 N501 053337 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w latach 2009-2012.

LITERATURA

- [1] Klingenberg G., Heimerl J.M., Gun Muzzle Blast and Flash, *Progress in Astronautics and Aeronautics*, Vol. 139, AIAA, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington, 1992.
- [2] Carlucci D.E., Jacobson S.S., *Ballistics. Theory and design of guns and ammunition*, CRC Press, Boca Raton – London – New York, 2008.
- [3] Erdos J.I., Del Guidice P.D., Calculation of muzzle blast flowfields, *AIAA Journal*, 13 (8), pp. 1048-1055, 1975.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Czyżewska M., Trębiński R., Warunki graniczne problemu głównego balistyki przejściowej, *Problemy mechatroniki. Uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa*, nr 1(3), Warszawa, s. 79-90, 2011.

- [7] Czyżewska M., Trębiński R., Symulacja przepływu gazodynamicznego wywołanego wypływem powietrza wypychanego z lufy przez pocisk, *Problemy mechatroniki. Uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa*, nr 4(10), Warszawa, s. 75-84, 2012.

Simulation of Projectile Motion around Muzzle

Marta CZYŻEWSKA, Radosław TRĘBIŃSKI

Abstract. In the paper results of simulation of motion of a projectile and gases in the barrel and at the outlet of the barrel have been presented. Numerical calculations were performed in the ANSYS Fluent 12.1 for 30 mm caliber gun and TP-T projectile moving in it. Changes of projectile velocity and changes of pressure and gas velocity inside and outside of the barrel were calculated. The simulation has proven that the velocity increase during the intermediate ballistics period can be considerable.

Keywords: mechanics, intermediate ballistics, simulation

