



## Symulacja przepływu gazodynamicznego wywołanego wplywem powietrza wypychanego z lufy przez pocisk

Marta CZYŻEWSKA, Radosław TRĘBIŃSKI

*Instytut Techniki Uzbrojenia, Wojskowa Akademia Techniczna  
ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa*

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki symulacji numerycznych wpływu powietrza wypychanego z lufy w wyniku ruchu pocisku podczas strzału na podstawie parametrów przepływu powietrza w lufie przed pociskiem. Stanowi to pierwszy etap symulacji przepływu w okresie balistyki przejściowej. Obliczenia numeryczne przeprowadzono w programie ANSYS Fluent 12.1 dla lufy kalibru 30 mm oraz poruszającego się w niej pocisku TP-T 30 × 173 mm naboju z prochem NC 1316. Porównano wyniki symulacji z publikowanymi w literaturze wynikami badań doświadczalnych i otrzymano jakościową zgodność wyników doświadczalnych z wynikami otrzymanymi na drodze symulacji.

**Słowa kluczowe:** mechanika, balistyka przejściowa, symulacja

### 1. WSTĘP

Zjawisko strzału z broni lufowej można podzielić na trzy okresy: balistykę wewnętrzną, przejściową i zewnętrzną. Balistyka wewnętrzna opisuje ruch pocisku w lufie, balistyka zewnętrzna – ruch pocisku poza lufą w ośrodku niezaburzonym wypływem gazów. Natomiast okres balistyki przejściowej opisuje zjawiska mające miejsce tuż po wylocie pocisku z lufy. Szeroką analizę zjawisk okresu balistyki przejściowej przedstawiono w monografii [1]. Opis tych zjawisk można również znaleźć w monografii [2]. W pracach [3-5] podjęto próbę matematycznego modelowania okresu balistyki przejściowej.

Wyniki modelowania analizowane były pod kątem oceny możliwości osłabienia intensywności fali podmuchowej, a także błysku towarzyszącego wypływowi gazów prochowych z lufy. Natomiast brak jest w literaturze analizy wpływu zjawisk balistyki przejściowej na ruch pocisku. Powstanie modelu matematycznego uwzględniającego ten wpływ może posłużyć do przewidywania zmian prędkości w tym okresie, co stanowi istotny problem dla implementacji modeli balistyki wewnętrznej w systemach kierowania ogniem.

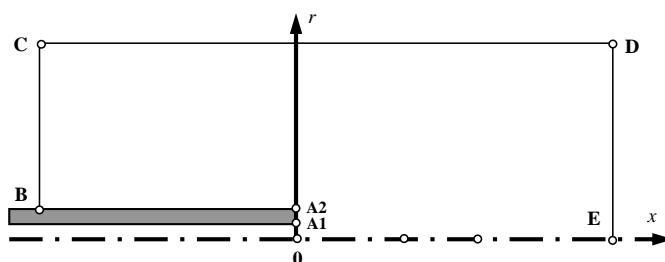
Okres balistyki przejściowej można podzielić na trzy etapy. Pierwszy etap rozpoczyna się w chwili dojścia do wylotu z lufy fali uderzeniowej, generowanej w powietrzu wypełniającej lufę przez ruch pocisku, a kończy się, gdy do wylotu lufy dotrze czoło pocisku. W drugim etapie pocisk blokuje wylot gazów prochowych 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 niniejszym artykule przedstawiono wyniki modelowania pierwszego etapu balistyki przejściowej.

## 2. SFORMUŁOWANIE MODELU

### 2.1. Opis modelu i przyjętych warunków początkowo-brzegowych

W celu uproszczenia modelu obliczeniowego przyjęto następujące założenia:

1. zakładamy, że 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); odcinki **A1A2** oraz **A2B** są ściankami lufy, natomiast odcinek **OE** jest przedłużeniem osi lufy,
2. wypływ gazów z lufy ma charakter naddźwiękowy,
3. fale będące wynikiem wypływu gazów nie docierają do granic obszaru **BC**, **CD** i **DE**; na granicach zadano warunki normalne:  $p_0 = 1013,25$  hPa,  $T_0 = 300$  K,
4. uwzględniany jest jedynie transport konwekcyjny i falowy; równania je opisujące oraz sformułowanie warunków granicznych przedstawiono w artykule [6],
5. powietrze wypływające z lufy i powietrze u wylotu lufy traktowane są jako gazy doskonałe o stałym cieple właściwym.



Rys. 1. Schemat obszaru, w obrębie którego modelowane są przepływy gazodynamiczne w okresie balistyki przejściowej [6]

Fig. 1. Diagram of the area within which the gasodynamic flows are modeled during the intermediate ballistics [6]

## 2.2. Siatka obliczeniowa

Obliczenia numeryczne przeprowadzono w programie ANSYS Fluent 12.1. W oparciu o schemat z rysunku 1 w solwerze Design Modeler powstała geometria 2D obszaru, do którego następuje wypływ gazów. Następnie przy wykorzystaniu solwera Meshing wygenerowano strukturalną siatkę obliczeniową, która ma 22 700 elementów. W okolicy wylotu lufy siatka została zagęszczona ze względu na przewidywane duże gradienty ciśnienia. W tabeli 1 przedstawione są wymiary układu.

Tabela 1. Wymiary obszaru obliczeniowego

Table 1. Dimensions of area calculation

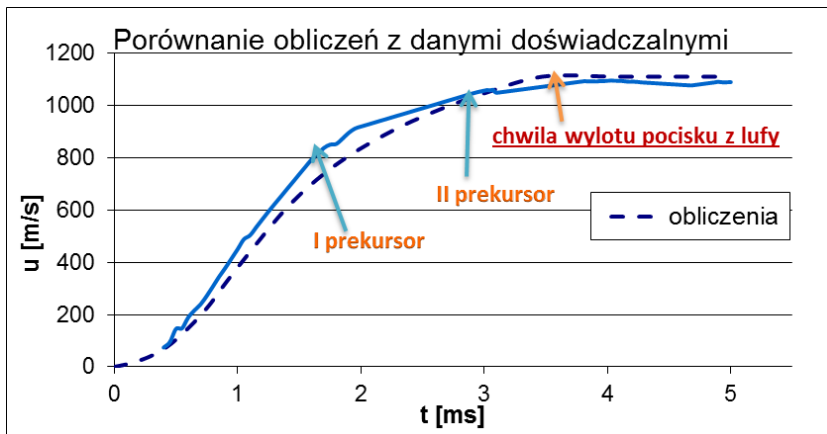
Odcinek	Wymiar [mm]
0-A1	15,0
A1-A2	5,0
A2-B	120,0
B-C	300,0
0-E	500,0

## 2.3. Warunki graniczne

Wykorzystując fakt, że ciśnienie gazów prochowych znacznie przewyższa ciśnienie powietrza przed pociskiem, można oddzielnie rozwiązywać problem główny balistyki wewnętrznej przy uproszczonym sposobie obliczania ciśnienia powietrza przed pociskiem. Uzyskana w wyniku tego rozwiązania problemu funkcja zależności prędkości pocisku od czasu wykorzystywana jest do rozwiązywania zagadnienia kompresji gazu przed pociskiem.

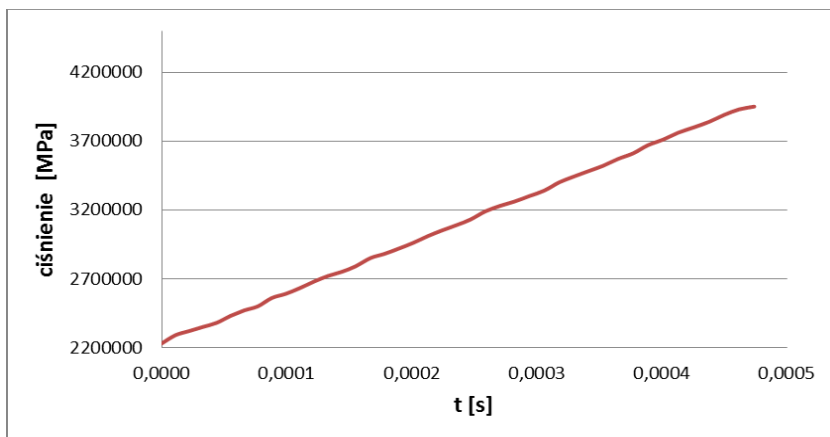
Problem główny balistyki wewnętrznej został rozwiązany numerycznie przy wykorzystaniu rzeczywistych parametrów prochu NC1316 oraz geometrii pocisku TP-T, a następnie porównany z wynikami doświadczalnymi [7]. Matematyczne sformułowanie podstawowego problemu balistyki wewnętrznej oraz analizę wyników jego rozwiązania przedstawiono w pracy [6]. Porównując wyniki obliczeń i wyniki badań doświadczalnych, stwierdzono rozbieżności wartości prędkości pocisku w granicach do 5% (rys. 2). Mogą być one spowodowane faktem, że użyty do śledzenia ruchu pocisku w lufie radar dopplerowski rejestrował faktycznie ruch fal uderzeniowych generowanych w powietrzu przed lufą. Świadczyć o tym może obecność załamań na krzywej zależności prędkości od czasu, które prawdopodobnie odpowiadają dotarciu do wylotu lufy pierwszej i drugiej fali uderzeniowej (w literaturze fale te nazywane są prekursorami).

Na podstawie obliczonego przebiegu prędkości pocisku określono parametry naddźwiękowego przepływu na wylocie lufy metodą opisaną w pracy [6]. Przebieg ciśnienia gazu na wylocie z lufy przedstawiony jest na rysunku 3, przebieg wydatku masy – na rysunku 4, natomiast przebieg temperatury – na rysunku 5.



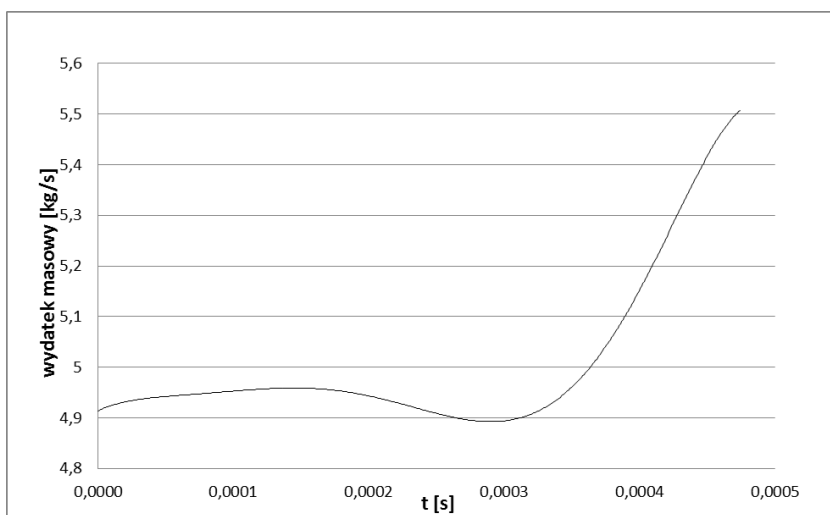
Rys. 2. Obliczony i określony doświadczalnie przebieg prędkości pocisku

Fig. 2. The calculated and experimentally determined the changes of the projectile velocity



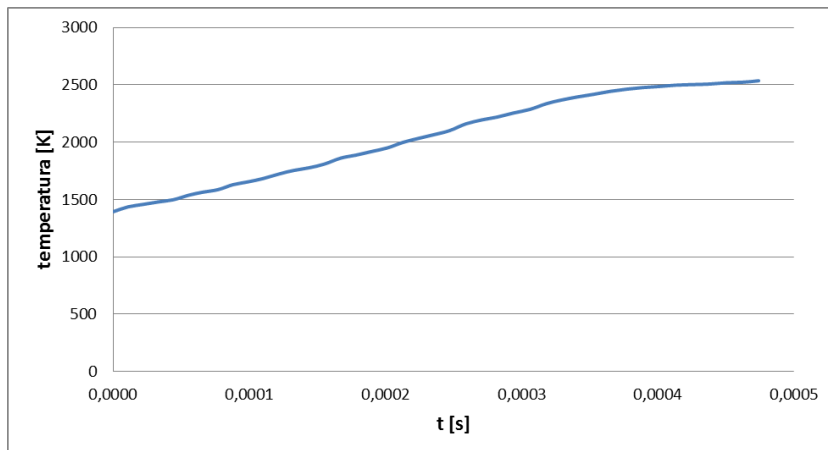
Rys. 3. Przebieg ciśnienia gazów na wylocie z lufy

Fig. 3. Changes of gas pressure at the muzzle exit



Rys. 4. Przebieg wydatku masy na wylocie z lufy

Fig. 4. Changes of mass flow at the muzzle exit



Rys. 5. Przebieg temperatury gazów na wylocie z lufy

Fig. 5. Changes of gas temperature at the muzzle exit

## 2.4. Symulacja

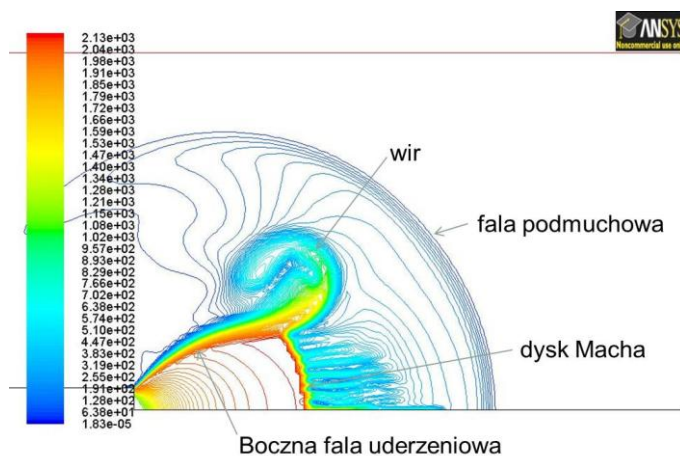
Symulacja procesów balistyki przejściowej została przeprowadzona w programie Fluent, który oparty jest na metodzie objętości skończonych. Modelowane zjawiska wypływu gazów z wylotu lufy są silnie nieustalone i zachodzą w nich szybkozmienne procesy, dlatego w programie do symulacji przyjęto model jawny nieustalony. Ze względu na naddźwiękowy przepływ ściśliwego gazu wybrano typ solwera Density-Based. W tym solwerze równania ciągłości, pędu, energii i transportu cząstek są rozwiązywane jednocześnie. Nieliniowe równania są zlinearyzowane przez utworzony układ równań dla zmiennych niezależnych dla każdej komórki obliczeniowej. Kontrola stabilności rozwiązania opiera się na liczbie Couranta (Courant – Friedrichs – Lewy), po jej określeniu Fluent ustala krok czasowy. Dla tego solwera oraz modelu jawnego nieustalonego wartość liczby Couranta nie powinna przekraczać 1,0. Dla charakterystycznych zagadnień balistyki wewnętrznej i przejściowej wartości liczby Reynoldsa  $Re = 10^5 \div 10^6$ , dominującymi procesami transportu są transport falowy i konwekcyjny. Dlatego na ogół pomija się zjawiska transportu dyfuzyjnego [8]. W związku z powyższym w modelu nie uwzględniono lepkości gazu oraz turbulencji przepływu. Dodatkowo wykorzystano schemat różnicowy drugiego rzędu „pod prąd” (ang. *second-order upwind*), w którym pochodna aproksymowana jest ilorazem różnicowym „wstecz” lub „w przód”, w zależności od kierunku przepływu oraz standardowe wartości współczynników relaksacji w celu ustabilizowania procesu obliczeniowego.

### 3. WYNIKI OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH

Z obliczeń przebiegów prędkości i ciśnienia powietrza na wylocie z lufy, przy zadanej prędkości pocisku wynika, że wypływ gazów wypychanych przez pocisk z przewodu lufy trwa 0,474 ms. Dlatego też przeprowadzono symulację tego procesu w tym czasie z krokiem czasowym 0,1  $\mu$ s. Dla każdego kroku czasowego następowała szybka zbieżność wyników na poziomie kilkunastu iteracji.

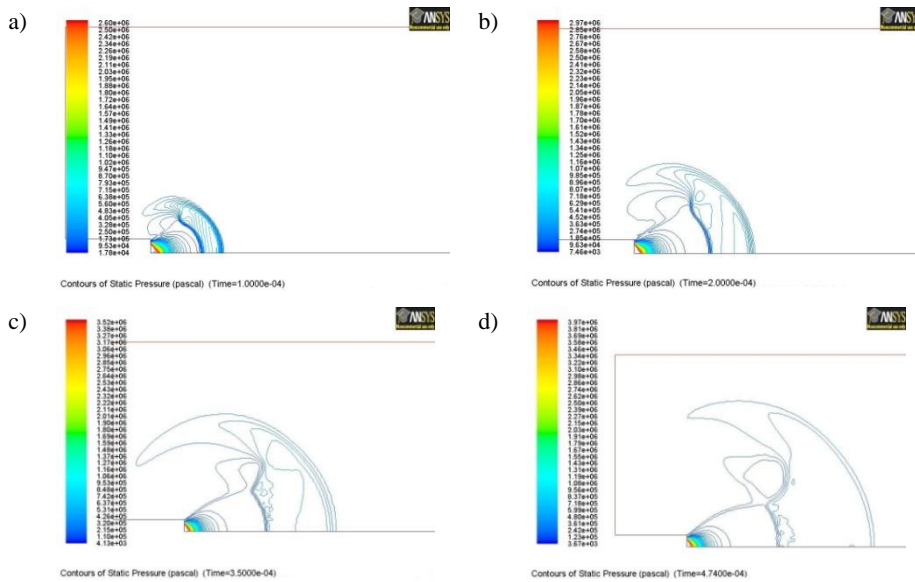
Na rysunku 6, przedstawiającym izolinie prędkości przepływu, dobrze widoczne są elementy prekursora przepływu opisanego w monografii [1], m.in. fala podmuchowa, boczna fala uderzeniowa, dysk Macha oraz wir.

Otrzymane z symulacji izolinie ciśnienia oraz prędkości gazów wypychanych przez pocisk z przewodu lufy dla wybranych kroków czasowych przedstawione są odpowiednio na rysunkach 7 i 8.



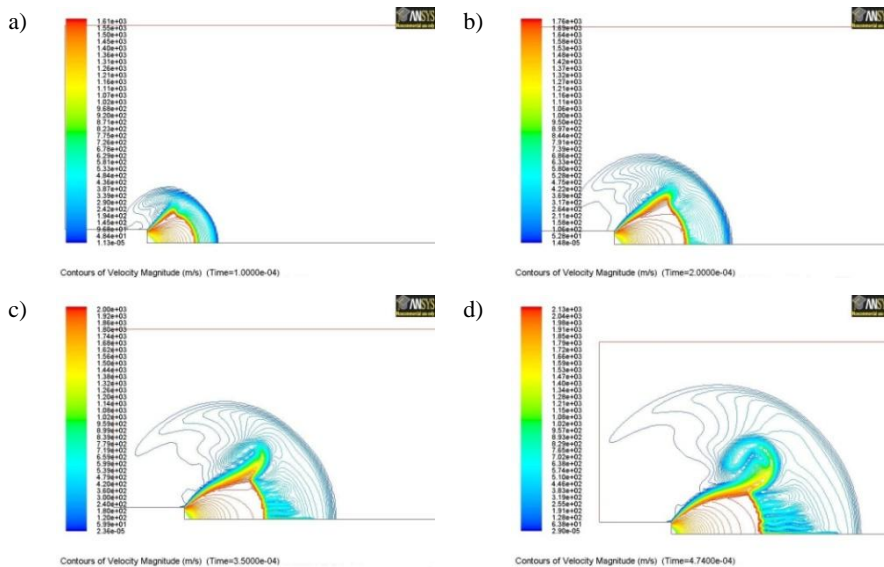
Rys. 6. Elementy przepływu gazodynamicznego dla prekursora przepływu (kontury prędkości  $u$  [m/s])

Fig. 6. Elements of gasodynamic flow for the precursor of flow (contours of velocity  $u$  [m/s])



Rys. 7. Izolinie ciśnienia gazów wypychanych przez pocisk z przewodu lufy w czasie wyrażone w [Pa]: a)  $t = 0,1$  ms, b)  $t = 0,2$  ms, c)  $t = 0,35$  ms, d)  $t = 0,474$  ms

Fig. 7. Isolines of pressure of the gases pushed by the bullet from the barrel at the time expressed in [Pa]: a)  $t = 0,1$  ms, b)  $t = 0,2$  ms, c)  $t = 0,35$  ms, d)  $t = 0,474$  ms



Rys. 8. Izolinie prędkości gazów wypychanych przez pocisk z przewodu lufy w czasie wyrażone w [m/s]: a)  $t = 0,1$  ms, b)  $t = 0,2$  ms, c)  $t = 0,35$  ms, d)  $t = 0,474$  ms

Fig. 8. Isolines of velocity of the gases pushed by the bullet from the barrel at the time expressed in [m/s]: a)  $t = 0,1$  ms, b)  $t = 0,2$  ms, c)  $t = 0,35$  ms, d)  $t = 0,474$  ms



#### **4. PODSUMOWANIE**

W artykule przedstawiono wyniki kolejnego etapu prac nad modelem teoretycznym, pozwalającym przewidywać zmiany prędkości pocisku w etapie balistyki przejściowej. W szczególności zaprezentowane zostały wyniki modelowania prekursora przepływu i wyniki ilustrujące charakter zmian parametrów przepływu w pobliżu wylotu lufy dla konkretnego układu miotającego. Wyniki symulacji wskazują, że zastosowana metoda obliczeniowa pozwala odtworzyć strukturę przepływu w pobliżu wylotu lufy, jakościowo zgodną z obserwowaną w doświadczeniach [1]. Można ją zatem wykorzystać w kolejnym etapie modelowania, w którym symulowany będzie proces wylotu gazów prochowych po opuszczeniu lufy przez pocisk.

W kolejnym etapie pracy opracowana zostanie metoda wyznaczenia parametrów przepływu gazodynamicznego w pobliżu lufy dla drugiego okresu balistyki przejściowej, kiedy pocisk opuszcza lufę, blokując jeszcze wyphyw gazów prochowych.

*Artykuł zawiera wyniki pracy naukowej finansowanej ze środków na naukę w latach 2009-2012 jako część projektu badawczego nr 0 N501 053337.*

#### **LITERATURA**

- [1] Klingenberg G., Heimerl J.M., Gun Muzzle Blast and Flash, 139. AIAA, *Progress in Astronautics and Aeronautics*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, vol. 139, 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), s. 79-90, 2011.

- [7] Leciejewski Z., Surma Z., Stępnia W., Piątek M., Badania prędkości pocisku na potrzeby opracowania modelu obliczeniowego balistyki okresu przejściowego, *Problemy techniki uzbrojenia*, nr 4, WITU Zielonka, s. 77-83, 2011.
- [8] Papliński A., *Modelowanie rozwoju spalania i wybuchu w niejednorodnych fizycznie ośrodkach reaktywnych*, WAT, Warszawa, 2009.

## **Simulations of the Gasodynamic Flow Induced by Air Discharge Ejectable from the Barrel by the Projectile**

Marta CZYŻEWSKA, Radosław TRĘBIŃSKI

**Abstract.** In the paper, the results of numerical simulations of air flow from the barrel of ejectable by the movement of the projectile during the shot on the parameters of air flow in the barrel before the bullet are presented. This represents the first phase flow simulation during the intermediate ballistics. Numerical calculations were performed in the ANSYS Fluent 12.1 to 30 mm caliber gun, and moving in the TP-T projectile 30 × 173 mm round with gunpowder NC 1316. Simulation results were compared with published findings in the literature and experienced qualitative agreement of results obtained with the experimental results obtained through simulation.

**Keywords:** mechanics, intermediate ballistics, simulation