



Pomiar prędkości pocisków małokalibrowych w laboratoryjnych badaniach osłon szklanych

KRZYSZTOF KICZYŃSKI, MAREK SUPRONIUK*

Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Optoelektroniki, *Instytut Podstaw Elektroniki,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. W artykule zaprezentowano znane oraz autorskie układy i metody pomiaru prędkości pocisków kaliber 4,5 mm. Dokładniej opisano układy pomiarowe wykorzystane do laboratoryjnych testów materiałów przeznaczonych na osłony w różnego rodzaju pojazdach. Zagadnienie to jest elementem międzynarodowego projektu PROTGLASS pt. „Teoretyczno-eksperymentalna optymalizacja własności ochronnych osłon szklanych”. Celem projektu jest stworzenie modelu matematycznego procesu pęknięcia osłon szklanych narażonych na udar mechaniczny.

Słowa kluczowe: pomiar prędkości pocisku, chronograf, bramka optyczna, bramka indukcyjna
Symbole UKD: 531.5

Wstęp

Broń małokalibrową w zakresie niemilitarnym wykorzystuje się powszechnie w strzelectwie sportowym. Istotna jest wówczas znajomość wartości prędkości pocisku opuszczającego lufę (zagadnienie balistyki zewnętrznej [1]). Wartość prędkości pocisku niesie bowiem dużo istotnych informacji:

- pozwala obliczyć energię kinetyczną pocisku,
- informuje o prawidłowym działaniu broni,
- informuje o jakości amunicji.

Broń małokalibrowa znajduje też zastosowanie w badaniach naukowych. W ramach międzynarodowego projektu E!3591-PROTGLASS pt. „Teoretyczno-eksperymentalna optymalizacja własności ochronnych osłon szklanych” realizowanego głównie przez zespół naukowo-badawczy Instytutu Optoelektroniki WAT

prowadzone były badania niszczące próbek materiałów szklanych oraz ceramicznych. Badania te miały na celu dostarczenie danych do zbudowania modelu matematycznego opisującego proces pęknięcia różnego rodzaju materiałów na skutek uderu mechanicznego. Dzięki temu modelowi możliwe jest symulowanie zachowania się materiałów przeznaczonych na osłony bez potrzeby ich wytwarzania i niszczenia, a tym samym szybsze i tańsze znalezienie optymalnych struktur materiałowych. Proces pęknięcia rejestrowany był za pomocą specjalnej kamery klatkowej umożliwiającej rejestrację zdarzeń w minimalnych odstępach 100 ns z czasem ekspozycji 100 ns. Udar mechaniczny był realizowany za pomocą kulki stalowej o średnicy 4,5 mm wystrzeliwanej z małokalibrowej broni pneumatycznej. Dla przeprowadzenia symulacji pęknięcia próbek jak najbliższej rzeczywistości niezbędna była znajomość wartości energii pocisku zarówno w momencie uderzenia w materiał, jak i po jego ewentualnym przebicciu. W tym celu konieczny był pomiar prędkości pocisku zarówno przed uderzeniem w próbkę, jak i po jej przebicciu. Okazało się bowiem, że rozrzut prędkości pocisków opuszczających lufę w kolejnych strzałach przekracza 15% wartości deklarowanej przez producenta. Przyczyn należy się doszukiwać w użyciu niestandardowej amunicji (kulki stalowe) oraz właściwościach karabinka pneumatycznego.

Wśród mierników prędkości pocisków małokalibrowych można wyróżnić dwie grupy urządzeń:

- realizujących pomiar czasu przelotu między dwiema bramkami fotoelektrycznymi,
- wykorzystujących efekt Dopplera [2, 3].

Mierniki prędkości wykorzystujące efekt Dopplera są powszechnie stosowane do pomiaru prędkości pocisków paintballowych, broni pneumatycznej sportowej oraz piłeczek tenisowych. Specyfika budowy stanowiska badawczego oraz przebieg eksperymentu nie pozwoliły jednak na zastosowanie miernika opartego na efekcie Dopplera.

Układy do pomiaru prędkości

W urządzeniach z bramkami fotoelektrycznymi pomiar prędkości v pocisków małokalibrowych sprowadza się na ogół do wyznaczenia czasu przelotu t określonej odległości s i obliczenia według zależności

$$v = \frac{s}{t}. \quad (1)$$

Uzyskuje się w ten sposób wartość średnią prędkości przelotu odległości s , co jest zupełnie wystarczające w większości zastosowań praktycznych i teoretycznych.

Zaniedbuje się balistykę toru pocisku, ponieważ wprowadza ona błąd pomiaru wielokrotnie mniejszy od innych czynników metody.

Oprócz bramek fotoelektrycznych, spotyka się także:

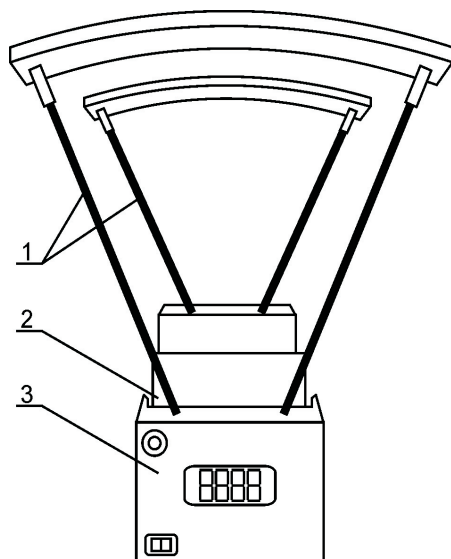
- jednorazowe czujniki zwarciove lub rozwarciove,
- bramki indukcyjne,
- bramki akustyczne.

W początkowej fazie eksperymentów zastosowano jednorazowe czujniki zwarciove w postaci dwóch warstw folii aluminiowej przedzielonej izolacją papierową, zrezygnowano jednak z tych czujników ze względu na kłopotliwą obsługę (po każdorazowym strzale należało wymienić czujniki na nowe). Podobny los spotkał czujniki rozwarciove w postaci cienkich drucików przerywanych przelatującym pociskiem. Czujniki akustyczne nie były brane pod uwagę ze względu na bardzo wysoki poziom zakłóceń generowanych przez broń pneumatyczną w szerokim zakresie fal dźwiękowych. Ostatecznie do pomiaru prędkości wylotowej pocisków wybrano miernik z bramkami fotoelektrycznymi, natomiast do pomiaru prędkości za próbką — miernik z czujnikiem indukcyjnym.

Mierniki mierzące czas przelotu określonej odległości są powszechnie wykorzystywane do precyzyjnego wyznaczania prędkości pocisków małokalibrowych. Anglojęzyczna nazwa handlowa tego typu urządzeń to „chronograph”. Na rynku krajowym używa się spolszczonej wersji — „chronograf” lub „chronometr”, chociaż określenie to dotyczy jedynie elementu urządzenia, jakim jest układ pomiaru czasu. Rynek osprzętu sportowej broni strzeleckiej oferuje duży wybór urządzeń do pomiaru prędkości pocisków. Najbardziej rozpowszechnionym modelem jest chronograf o konstrukcji takiej, jak np. Shooting Chrony M-1 [4]. Na rysunku 1 pokazano w uproszczeniu konstrukcję chronografu.

Urządzenie jest wyposażone w składane ramki 1 ograniczające obszar skutecznego działania fotokomórek. Dwa okienka (fotokomórki) umieszczone w plastikowych płytkach z przodu i z tyłu obudowy 2 są ukryte pod soczewkami i poprzez pomiar zmiany natężenia światła wykrywają przelot pocisku. Gdy pocisk przelatuje nad pierwszym czujnikiem, fotokomórka włącza stoper, który bardzo precyzyjnie odlicza czas. Stoper zatrzymuje się, gdy nad drugim czujnikiem przeleci pocisk. Procesor w chronografie przelicza czas na prędkość i wyświetla ją w metrach na sekundę (m/s) na panelu czołowym 3.

Zakres pomiaru prędkości pocisku (kuli, strzały, śrutu, kulki paintballowej itp.) wynosi od 10 do 2120 m/s z błędem nie większym niż 0,5%. Parametry te kwalifikowały chronograf do wykonania pomiarów w badaniach. W trakcie eksperymentów okazało się jednak, że układ fotoelektryczny wymaga doskonale rozproszonego oświetlenia zewnętrznego (chronografy stosuje się najczęściej na otwartej przestrzeni, gdzie oświetlenie zapewnia tło nieba). Badania laboratoryjne były natomiast przeprowadzane w budynku, a na stanowisku pomiarowym pracowała lampa błyskowa

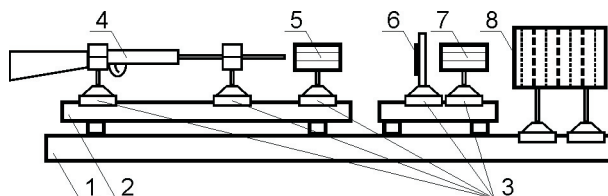


Rys. 1. Szkic konstrukcji chronografu Shooting Chrony M1

dużej mocy zapewniająca podświetlenie próbek dla kamery klatkowej. Dlatego też zdecydowano się na skonstruowanie miernika prędkości pocisku odpornego na wszystkie niekorzystne czynniki występujące w trakcie badań.

Stanowisko badawcze i fotoelektryczny miernik prędkości

Na rysunku 2 pokazana jest w uproszczeniu konstrukcja stanowiska. Dla uzyskania maksymalnej precyzji oraz powtarzalności strzałów, elementy stanowiska są umocowane na płycie granitowej 1. Masa tej płyty gwarantuje stabilność położenia karabinka oraz badanych próbek zarówno w chwili oddania strzału, jak i po uderzeniu pocisku w próbkę. Rozpędzenie pocisku do wymaganej prędkości uzyskano za pomocą karabinka pneumatycznego gładkolufowego kal. 4,5 mm 4. Pomiar prędkości pocisku wystrzelonego z lufy jest realizowany przez optoelektryczny miernik prędkości 5. Prędkość pocisku wynosi około 250 m/s. Do ustawienia karabinka oraz próbek 6 wykorzystano ławy optyczne 2 i specjalnie zaprojektowane uchwyty rozłączne 3 z możliwością regulacji wysokości. Dla zapewnienia maksymalnego wykorzystania energii strzału oraz powtarzalności trajektorii lotu pocisków, odległość powierzchni próbki od wylotu lufy została ustalona na 350 mm. Karabinek ze względu na znaczną długość jest przytwierdzony do ławy optycznej dwoma uchwyty z amortyzacją tłumiącą drgania. Mocowanie karabinka do uchwytów jest wykonane sprężyste tak, aby umożliwić ruch broni w reakcji na skok



Rys. 2. Stanowisko do badań próbek szklanych

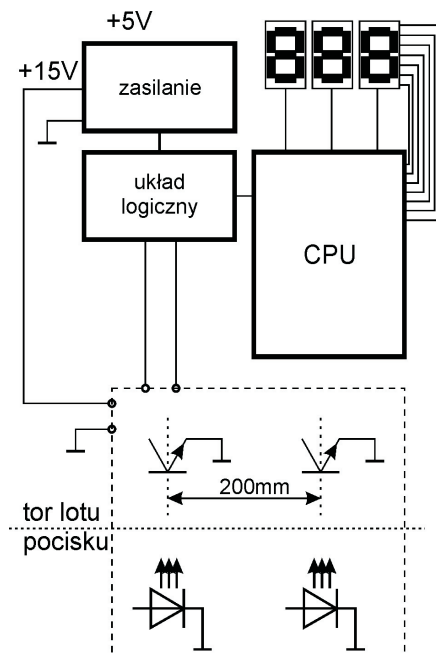
sprężyny i tłoka (zjawisko odrzutu odwrotnego [5]). Próbki materiału badanego 6 umieszczone są na uchwycie z amortyzacją tłumiącą drgania. Prędkość pocisku po przebicciu próbki jest mierzona przez indukcyjny miernik prędkości 7. Po pierwsze, w przypadku mniej wytrzymałych próbek konieczne jest zatrzymanie pocisku po ewentualnym przebicciu płytki materiału badanego. Po drugie, należy ograniczyć rozprzestrzenianie się odprysków próbki ze względu na bezpieczeństwo przyrządów pomiarowych. Kulochwyt ma konstrukcję wielowarstwową w celu wyeliminowania możliwości odbicia pocisku po przebicciu próbki. Do konstrukcji kulochwytu użyto warstw płytek wiórowych przekładanych papierem. Zapewnia to skuteczne zatrzymanie pocisku oraz eliminuje możliwość odbicia. Na rysunku nie pokazano kamery klatkowej, która jest umieszczona poza osią strzału za próbką (kamera jest chroniona dodatkową obudową i skierowana pod kątem 45° do osi strzału) oraz bramki optycznej do wyzwalania kamery umieszczonej przed próbką 6.

Schemat blokowy miernika prędkości pokazany jest na rysunku 3. Miernik mierzy czas przelotu pocisku między dwiema parami transoptorów na drodze 200 mm.

Przecięcie osi optycznej bramek przez poruszający się pocisk powoduje wytworzenie dwóch impulsów, których odstęp w czasie Δt jest związany z prędkością pocisku v zależnością:

$$v = \frac{0,2}{\Delta t}. \quad (2)$$

Impulsy powstające w bramkach są formowane przez wzmacniacze analogowe na wejściu układu logicznego. Zwiększana jest tu stromość zboczy oraz ograniczana amplituda impulsów do wartości nieprzekraczającej 5 V. Na wyjściu układu logicznego po każdym prawidłowym zadziałaniu bramek fotoelektrycznych powstają dwa impulsy o poziomach TTL. Czas między nimi jest czasem przelotu pocisku między bramkami. Czas ten jest przeliczany na prędkość przez algorytm napisany w kodzie maszynowym mikroprocesora jednoukładowego PIC16F84A. Prawidłowy start algorytmu zapewnia funkcja zerowania ustawień za pomocą przycisku reset. Jest ona także realizowana samoczynnie po włączeniu zasilania mikroprocesora. Algorytm zlicza liczbę impulsów zegara taktującego mikroprocesor, po czym przelicza tę



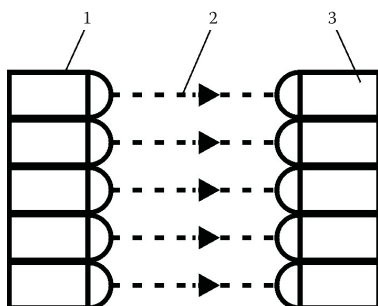
Rys. 3. Schemat blokowy miernika prędkości

liczbę na prędkość pocisku v . Wartość prędkości jest wyświetlana na wyświetlaczu diodowym do chwili zrestartowania mikroprocesora przyciskiem RESET. Zakres pomiaru prędkości jest równy od 1 do 999 m/s. Praktyczny zakres stosowania tego miernika zalecany jest dla prędkości większych od 100 m/s ze względu na wpływ błędu digitalizacji $\pm 1\text{LSB}$, który jest równy ± 1 m/s. Niepewność pomiaru ze względu na ten błąd jest wówczas mniejsza od 1%.

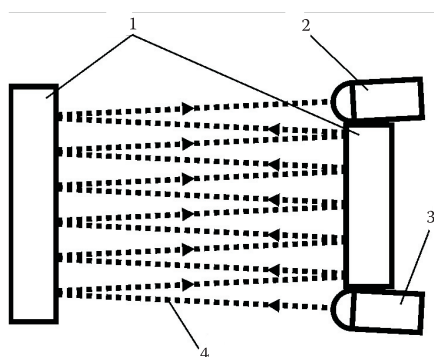
W pierwszej fazie prób zastosowano klasyczne bramki fotoelektryczne w zakresie podczerwieni. Bardzo szybko okazało się, że dwuelementowe bramki fotoelektryczne (pary dioda świecąca — fototranzystor) można wykorzystać do pomiarów prędkości pocisków o stabilnym powtarzalnym torze lotu. Tak zachowuje się pocisk blisko wylotu lufy w początkowej fazie lotu. Jednak zastosowanie nietypowej amunicji oraz przemieszczenie broni po serii strzałów powodowały, że trajektoria lotu pocisku nie była w pełni powtarzalna. W celu poszerzenia pola detekcji toru lotu pocisku zastosowano zwielokrotnioną bramkę fotoelektryczną (rys. 4).

Na rysunku 4 pokazano układ nadajników (1) oraz odbiorników (3) fotoelektrycznych, który umożliwia poszerzenie obszaru zadziałania bramki. Przy przecięciu jednej z wiązek światła (2) odpowiedni odbiornik generuje sygnał impulsowy, który poddawany jest dalszemu przekształcaniu w układzie logicznym jak na rysunku 3. Wadą tego rozwiązania jest konieczność zastosowania więcej niż jednej pary

dioda świecąca — fototranzystor oraz precyzyjne zestrojenie położenia każdej pary w celu uzyskania maksymalnej czułości. Ponieważ bramka zwielokrotniona okazała się zawodna w działaniu, zaprojektowano i wykonano bramkę z wykorzystaniem zwierciadeł (rys. 5).



Rys. 4. Układ fotoelektrycznej bramki zwielokrotnionej



Rys. 5. Układ fotoelektrycznej bramki poszerzonej z wykorzystaniem pary zwierciadeł

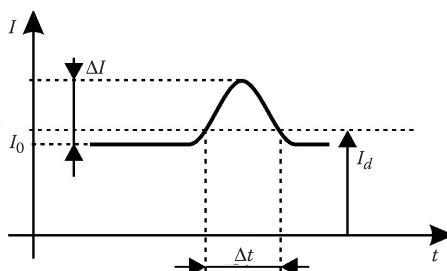
Układ jest zbudowany z dwóch równolegle umieszczonych zwierciadeł płaskich (1), jednego źródła spójnej wiązki promieniowania (3) i jednego odbiornika promieniowania (2). W układzie tym odległość między sąsiednimi wiązkami promieniowania jest ustawiana za pomocą kąta nachylenia nadajnika. Dzięki zastosowaniu spójnej wiązki światła (uzyskanej za pomocą lasera półprzewodnikowego) możliwe było o wiele dokładniejsze niż w układzie z wieloma nadajnikami i odbiornikami zagęszczenie obszaru spodziewanego przelotu pocisku wiązkami promieniowania. Przecięcie którejkolwiek z wiązek powoduje przerwanie oświetlenia odbiornika, a tym samym wygenerowanie sygnału impulsowego. Zastosowanie dwóch tego typu poszerzonych bramek fotoelektrycznych w miejsce zwykłych par dioda-fototranzystor zapewniło niezawodną i dokładną detekcję przelatującego pocisku bez względu na zmiany jego trajektorii.

Bramka indukcyjna

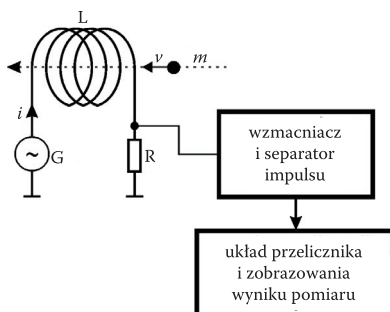
W prowadzonych badaniach używane były pociski metalowe — stalowe lub ołowiane. Stworzyło to możliwość zastosowania do detekcji ruchu pocisków czujników indukcyjnych. Ruch określonej masy metalu w polu magnetycznym cewki indukcyjnej wywołuje dwa zjawiska:

- zjawisko samoindukcji spowodowane zmianą przenikalności magnetycznej środowiska cewki;
- zjawisko zwiększonych strat mocy czynnej w masie metalu na skutek wystąpienia prądów wirowych.

Ponieważ ołów jest diamagnetykiem, zjawisko samoindukcji w przypadku zastosowania pocisków z tego materiału jest znikome. Natomiast zarówno pociski stalowe, jak i ołowiane są podatne na powstawanie prądów wirowych. Na skutek powstania w materiale pocisku prądów wirowych ulega zwiększeniu prąd pobierany przez cewkę indukcyjną. Zjawisko to obrazuje wykres na rysunku 6. W czasie, gdy pocisk pozostaje pod wpływem pola magnetycznego cewki, prąd pobierany przez cewkę ulega zmianom, tworząc impuls pokazany przykładowo na wykresie



Rys. 6. Przebieg wartości skutecznej prądu w cewce indukcyjnej podczas przelotu pocisku metalowego



Rys. 7. Pomiar prędkości pocisku metalowego za pomocą czujnika indukcyjnego

czasowym. Stromość zboczy impulsu jest proporcjonalna do prędkości, natomiast amplituda — do wartości strat mocy w materiale pocisku.

Detekcja nachylenia zbocza impulsu jest trudna do zrealizowania, dlatego lepiej obliczać prędkość, mierząc czas przelotu pocisku. Detekcja zmian prądu na poziomie wyższym od stanu ustalonego I_0 daje czas Δt , który jest bezpośrednio odwrotnie proporcjonalny do prędkości.

Na rysunku 7 pokazany jest układ do pomiaru prędkości pocisku metalowego wykorzystujący cewkę indukcyjną L w charakterze przetwornika pierwotnego. Pocisk o masie m poruszający się z prędkością v wewnątrz cewki powoduje powstanie impulsu wartości skutecznej prądu i . Impuls ten po wyodrębnieniu i wzmocnieniu jest podawany do układu przelicznika, gdzie następuje detekcja czasu i na tej podstawie obliczenie prędkości.

Zaletą tego typu rozwiązania jest możliwość pomiaru prędkości pocisków metalowych poruszających się po nieprzewidywalnej trajektorii oraz niewrażliwość czujnika na pojawienie się niemetalowych odprysków przestrzelonego materiału. Układ nadaje się zatem do pomiarów prędkości zarówno przed materiałem badanym, jak i po nim, gdzie spodziewać się można odchylenia toru lotu pocisku i wystąpienia fragmentów przestrzelonego materiału. Zwiększenie dokładności pomiaru jest możliwe przy zastosowaniu dwóch cewek indukcyjnych umieszczonych w torze lotu pocisku analogicznie jak to ma miejsce w przypadku bramek fotoelektrycznych. Pomiar prędkości odbywa się wówczas w układzie pokazanym na rysunku 3.

Podsumowanie

Pomimo istnienia szerokiej oferty urządzeń do pomiaru prędkości pocisków małokalibrowych, okazało się, że żadna z nich nie spełnia warunków wynikających z realizowanego zadania badawczego. Zaprojektowane i skonstruowane specjalnie dla potrzeb wykonywanych badań mierniki prędkości obecnie poddawane są modyfikacjom głównie w celu zwiększenia zakresu pomiarowego powyżej 1000 m/s. Potrzeba taka wynikła na skutek planowanego zastąpienia karabinka pneumatycznego wyrzutnią prochową w celu uzyskania większej energii pocisków. Już przy zastosowaniu broni pneumatycznej pojawiły się problemy z fałszywymi impulsowymi sygnałami zakłócającymi generowanymi podczas oddawania strzału. Okazało się, że uderzenie tłoka w karabinku pneumatycznym generuje paczkę impulsów nanosekundowych potrafiących zakłócić pracę układu logicznego miernika prędkości. Także detekcja przelotu pocisku przez bramki fotoelektryczne nie była jednoznaczna, dopóki nie zastosowano laserowego źródła światła do oświetlenia fotodetektorów. Autorzy spodziewają się zwiększenia amplitudy zakłóceń przy większych energiach strzału. Pojawią się wówczas produkty spalania prochu, co dodatkowo utrudni precyzyjną detekcję pocisku. Kłopoty takie pojawiły się już

przy karabinku pneumatycznym, gdzie przed pociskiem z lufy wystrzeliwany był obłoczek par smaru. Smarowanie lufy było niezbędne, aby stalowa kulka nie uległa zaklinowaniu. Zjawisko udało się zniwelować za pomocą papierowej przesłony przed brankami miernika prędkości.

Ogromną zaletą przyrządów pomiarowych własnej konstrukcji jest łatwiejsze przeciwdziałanie niekorzystnym zjawiskom towarzyszącym eksperymentowi. Stosowanie gotowych przyrządów jest z kolei znacznie mniej pracochłonne, jednak tylko do chwili, kiedy działają one poprawnie.

Artykuł wpłynął do redakcji 14.04.2008 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w kwietniu 2008 r.

LITERATURA

- [1] J. SZADKOWSKI, *Balistyka zewnętrzna. Model balistyczny*, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, 2004.
- [2] <http://www.patentstorm.us/patents/6378367-fulltext.html>
- [3] <http://www.radarguns.com/bushnell-radar-guns-101900.html>
- [4] <http://www.shootingchrony.com/>
- [5] <http://pm.home.pl/gunsold/recoil.html>

K. KICZYŃSKI, M. SUPRONIUK

Measurement of speed of small-calibre bullets in laboratory tests of glass shields

Abstract. The well-known method of measurement of speed bullets, of a calibre of 4.5 mm as well as the author's systems were presented in this paper. The measuring systems used to laboratory tests of materials designed for protection of different types of vehicles were described more precisely. This problem is an element of the international project PROTGLASS "Theoretical-Experimental Optimisation of the Protective Properties of Glass Shields". The aim of the project is to create a mathematical model of cracking process of glass shields undergoing mechanical stroke.

Keywords: bullet speed measurement, chronograph, light barrier, coil barrier, ballistics

Universal Decimal Classification: 531.5