



POMIARY WŁASNOŚCI GŁOWIC ODŁAMKOWO – BURZĄCYCH MEASUREMENTS OF CHARACTERISTICS FOR FRAGMENTATION – BURSTING HEADS

Andrzej DŁUGOŁĘCKI, Jarosław DĘBIŃSKI, Andrzej FARYŃSKI,
Tomasz KWAŚNIAK, Łukasz SŁONKIEWICZ, Zbigniew ZIÓLKOWSKI

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych - Air Force Institute of Technology
ul. Księcia Bolesława 6, 01-494 Warszawa, Poland
Author's e-mail: andrzej.farynski@itwl.pl; ORCID: 0000-0003-1232-2747

DOI 10.5604/01.3001.0015.5047

Streszczenie: W pracy poruszono problemy pojawiające się w trakcie badań głowic odłamkowo – burzących średniego kalibru, polegające na oddziaływaniu fal uderzeniowych (FU) generowanych przez lecące odłamki na wyniki pomiarów prędkości FU wytwarzanej przez samą głowicę (FUG). Opisano zastosowany przez autorów sposób ochrony czujników pomiarowych przed niszcącym oddziaływaniem odłamków. Zbadano rozkład wytworzonych odłamków pod względem rozmiarów i w funkcji kąta rozlotu. Zmierzono średnią prędkość najszybszych odłamków (2100 m/s) na bazie początkowych 10 m. Zbadano rozkład prędkości FUG w funkcji promienia propagacji.

Słowa kluczowe: fizyka wybuchu, rozlot odłamków, fala uderzeniowa.

1. Wstęp

Celem opisanych niżej badań był pomiar charakterystyk rozlotu odłamków oraz powietrznej fali uderzeniowej (FU), wytworzonych w czasie wybuchu głowic odłamkowo

Abstract: The paper deals with questions appearing at investigation of high explosive-fragmentation heads of medium calibre when the blast waves (BW) generated by the flying fragments affect the results of velocity of the BW generated by the head itself (HBW). A method used by the authors for protection of measurement sensors against destructive action of the fragments is described. Distribution of produced fragments regarding the sizes and in function of scattering angle was studied. Mean velocity of highest speed (2100 m/s) fragments was measured on the base of first 10 m. Distribution of HBW velocities in function of radius of propagation was measured.

Keywords: physics of explosion, scattering of fragments, blast wave.

1. Introduction

Experiments described below were aimed to measure characteristics of scattered fragments and air blast wave (BW) produced at explosion of medium calibre

– burzących średniego kalibru. Dostępna do badań partia głowic była niezbyt liczna, dlatego zakres badań nie mógł być zbyt obszerny.

W pracy opisano metodę i wyniki pomiaru rozkładu przestrzennego rozlotu odłamków i ich liczby, rozkładu odłamków w funkcji rozmiarów i mas oraz prędkości początkowej tworzonych odłamków (energii kinetycznej). Przedstawiono pomiar przebiegu nadciśnienia $\Delta p(t)$ **za frontem** FU głowicy oraz – dwiema metodami – pomiar jego wartości maksymalnej **na froncie** Δp_{sw} , która stanowi wartość początkową $\Delta p(t)$. Jedną z tych metod opiera się na pomiarze lokalnej prędkości FU za pomocą progowych czujników ciśnienia. Fakt rozlotu dużej liczby odłamków z prędkościami w zakresie od kilkuset m/s do kilku km/s stwarza specyficzne warunki pomiarów, na które w przedstawionej pracy zwrócono szczególną uwagę.

Odłamki poruszające się z dużymi prędkościami naddźwiękowymi wyprzedzają już w niewielkiej odległości od głowicy (ok. 20 kalibrów) powietrzną falę uderzeniową, generowaną w trakcie wybuchu. Jednocześnie są one źródłem stożkowych fal uderzeniowych o dużej amplitudzie. Dla przykładu, w powietrzu o gęstości $\rho_P \approx 1,2 \text{ kg/m}^3$ [1] odłamek o przybliżonych wymiarach $5 \times 10 \times 10 \text{ mm}$, o średniej powierzchni czołowej $S_{av} \approx 10^{-4} \text{ m}^2$, mający w odległości 10 m od głowicy prędkość $v_F \approx 2 \text{ km/s}$, wytwarza przed sobą falę czołową o nadciśnieniu $\Delta p_{F0} = \rho_P v_F^2 / 2 \approx 2,4 \text{ MPa}$, podczas gdy w tej samej odległości od głowicy nadciśnienie na froncie powietrznej FU generowanej przez jej wybuch wynosi jedynie $\Delta p_{sw} \sim 0,01 \text{ MPa}$ (patrz punkt 2.3.2).

Chociaż nadciśnienie na froncie stożkowej FU odłamka, będącej kontynuacją fali

high-explosive-fragmentation heads. The lot of heads accessible for investigation was not too numerous what limited the scope of tests.

The paper describes a method and measurement results of spatial distribution of scattered fragments, and their number, and distribution of fragments in function of sizes and masses and initial velocities of produced fragments (kinetic energy). The overpressure $\Delta p(t)$ is measured behind the front of head's BW, and – by two methods - its maximal value on the front Δp_{sw} being the initial value of $\Delta p(t)$. One of these methods is based on measurement of the local velocity of the BW by threshold sensors of pressure. The outfly of a great number of fragments with velocities between a few hundred m/s and a few km/s creates specific conditions of measurements and special attention was paid to them in the paper.

The air blast wave generated at the explosion is overtaken by fragments traveling with high supersonic velocities just at a low distance from the head (ca. 20 calibres). At the same time they are the source of conical impact waves with high amplitude. For instance, in the air with density $\rho_P \approx 1.2 \text{ kg/m}^3$ [1] a fragment with approximate size $5 \times 10 \times 10 \text{ mm}$, and the mean frontal surface $S_{av} \approx 10^{-4} \text{ m}^2$, and with velocity of $v_F \approx 2 \text{ km/s}$ creates before it a frontal wave with overpressure $\Delta p_{F0} = \rho_P v_F^2 / 2 \approx 2.4 \text{ MPa}$ at the distance of 10 m from the head, whereas the overpressure on the front of the air BW generated by its explosion is just $\Delta p_{sw} \sim 0.01 \text{ MPa}$ (see point 2.3.2).

Even if the overpressure on the front of fragment's conical BW, being a development of the frontal wave, falls down with

czołowej, w oczywisty sposób spada wraz z odległością od trajektorii odłamka (Catovic i in., 2012; Yeth i in.) to oczywiste jest, że przelatując odpowiednio blisko progowego czujnika ciśnienia odłamek może spowodować zadziałanie tego czujnika przed dojściem do niego FU wybuchu głowicy, stając się źródłem dużego błędu pomiaru.

Problem fragmentacji skorupy, proces tworzenia i segregacji pod względem liczby, kształtu i rozmiarów odłamków pocisków, o podobnej wielkości do obiektów będących przedmiotem opisanych niżej badań (Starczewski, 2017).

Stosowany w dalszym ciągu termin i oznaczenie „nadcisnienie Δp ” oznaczać będzie nadcisnienie względem ciśnienia atmosferycznego, odpowiednio $\Delta p(t)$ – funkcyjną zależność nadcisnienia od czasu.

2. Opis badań głowicy odłamkowo-burzącej

Nadcisnienie Δp_{sw} na froncie FU zależy od jej prędkości v_{sw} . W przypadku płaskiej FU (przybliżenie to można przyjąć lokalnie w odległości dużo większej od rozmiarów głowicy i jest ono wystarczająco dokładne do celów praktycznych) wielkość nadcisnienia Δp_{sw} można wyznaczyć z zależności (Rościszewski, 1957):

$$\Delta p_{sw} = p_a \frac{2k}{(k+1)} \left(\left(\frac{v_{sw}}{c_0} \right)^2 - 1 \right) \quad (1)$$

gdzie:

$p_a \approx 985$ hPa – ciśnienie atmosferyczne w trakcie badań,

v_{sw} [m/s] – zmierzona prędkość FU,

c_0 [m/s] = $20,1 (273,15 + t_C)^{1/2}$ – prędkość dźwięku w powietrzu,

$t_C \approx 17$ [°C] – temperatura powietrza w trakcie badań,

$k = 1,4$ – wykładnik adiabaty dla powietrza.

the distance from the fragment's trajectory (Catovic et al., 2012; Yeth et al.), it is obvious that the fragment flying near a threshold sensor of pressure may activate such sensor before it was reached by the BW of the head, and become a source of a significant measurement error.

Problem of shell fragmentation, and process of creation and segregation of projectile fragments, regarding their number and shape and size, with the dimensions similar to objects which are the objectives of investigations described below (Starczewski, 2017).

The used term of “overpressure Δp ” means the overpressure referred to the atmospheric pressure, and respectively $\Delta p(t)$ – the functional dependence of the overpressure on the time.

2. Description of Tests for Fragmentation-bursting Head

The overpressure Δp_{sw} in front of BW depends on its velocity v_{sw} . In the case of a plane BW (it is justified locally for distances significantly greater than the size of the head, and it is sufficiently accurate for practical purposes) the overpressure Δp_{sw} may be identified from dependence (Rościszewski, 1957):

where:

$p_a \approx 985$ hPa – atmospheric pressure at testing,

v_{sw} [m/s] – measured velocity of BW,

c_0 [m/s] = $20.1 (273.15 + t_C)^{1/2}$ – velocity of sound in the air,

$t_C \approx 17$ [°C] – temperature of air at testing,

$k = 1.4$ – adiabatic exponent for the air.

Therefore, depending on possessed in-

Zatem, w zależności od posiadanych przyrządów, można mierzyć bezpośrednio $\Delta p(t)$ w funkcji czasu t i odległości r od epicentrum wybuchu lub prędkość FU w funkcji r , przy czym obliczona wartość Δp_{sw} odpowiada amplitudzie (początkowej wartości) mierzonego $\Delta p(t)$.

Wyznaczenie czasu trwania impulsu nadciśnienia możliwe jest tylko poprzez pomiar bezpośredni $\Delta p(t)$. Bezpośredni pomiar Δp_{sw} w funkcji czasu wymaga stosowania drogich, produkowanych przez nieliczne firmy na świecie, odpowiednio ukształtowanych czujników piezoelektrycznych.

W czasie badań należy się liczyć z możliwością uszkodzenia czujników przez odłamki, które w pewnej odległości od głowicy wyprzedzają front fali uderzeniowej i mogą niszczyć te czujniki przed zarejestrowaniem badanych parametrów. W celu wyeliminowania ryzyka zniszczenia drogich czujników, w opisywanej metodzie do pomiaru prędkości FU zastosowano opracowane w ITWL znacznie tańsze czujniki piezoelektryczne o charakterystyce progowej, realizujące zwarcie wejścia miernika czasu po przekroczeniu określonego progu amplitudy ciśnienia na froncie FU.

2.1. Schemat eksperymentu

Badana głowica miała postać stalowego cylindra o zewnętrznej średnicy $d_g \approx 150$ mm i średniej grubości ścianki bocznej $w_0 \approx 7$ mm. Materiał wybuchowy (MW) o masie $m_{MW} = 8$ kg, wykonany na bazie HMX, RDX i TNT, wypełniał ten cylinder w obszarze o wysokości $h_g \approx 33$ cm (wymiar ten nie obejmował den – dolnego i górnego, które miały grubość znacznie większą od grubości ścianki bocznej). W czasie badań oś głowicy, umieszczanej na stoliku tak, by jej środek znaj-

struments, $\Delta p(t)$ can be measured directly in function of time t and distance r from the epicentre of explosion, or the velocity of BW in function of r , and the calculated value of Δp_{sw} is the amplitude (initial value) of measured $\Delta p(t)$.

Identification of duration time for the surge of overpressure can be only done by a direct measurement of $\Delta p(t)$. Direct measurements of Δp_{sw} in function of time requires the expensive piezoelectric sensors which are suitably shaped and manufactured only by a few companies.

Sometimes the sensors can be damaged by the fragments which at the certain distance from the head overtake the front of the blast wave and can destroy these sensors before recording the investigated parameters during the tests. The risk of damaging the expensive sensors was eliminated in the described method of measuring the velocity of BW by using significantly cheaper piezoelectric sensors developed in the Air Force Institute of Technology (AFIT) with a threshold characteristics and short-circuiting the input of a time meter when a specific threshold of pressure amplitude on the front of the BW is exceeded.

2.1. Configuration of Experiment

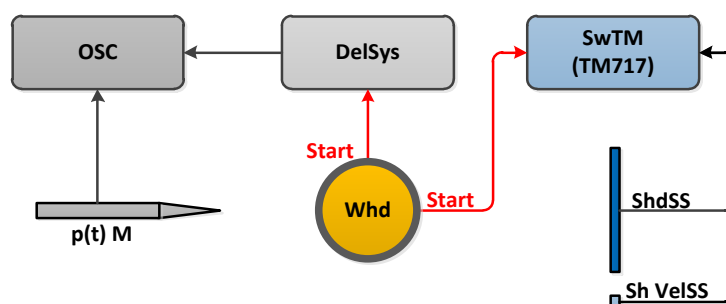
Tested head was in form of a steel cylinder with external diameter $d_g \approx 150$ mm and average thickness of side wall $w_0 \approx 7$ mm. Explosive material (EM) with the mass of $m_{MW} = 8$ kg was made on the base of HMX, RDX and TNT to fill up the cylinder in the length of $h_g \approx 33$ cm (the dimension does not include the bases, both upper and bottom which were much thicker than the side walls). The centre of the head placed on a table was at $h \approx 1$ m above the

dował się na wysokości $h \approx 1$ m nad gruntem, ustawiana była pionowo – pozwalało to na założenie izotropowego rozlotu w płaszczyźnie poziomej. Głowica pobudzana była zapalnikiem elektrycznym od dołu.

Organizację układu pomiarowego przedstawiono w sposób ogólny na rys.1.

ground and its axis was set vertically during the tests what justifies the assumption on isotropic outfly in the horizontal plane. The head was detonated at the bottom by an electric fuse.

General arrangement of the measurement system is presented in Fig. 1.



Rys. 1. Schemat współdziałania podzespołów układu pomiarowego: Whd – badana głowica, DelSys – układ synchronizujący, OSC – oscyloskop, p(t)M – czujnik(i) ciśnienia, ShdSS / ShkVelSS – (zamiennie) zespoły zwarciovych płaszczyznowych czujników prędkości odłamków lub czujników pomiaru prędkości FU, SwTm – miernik czasów (stoper elektroniczny)

Fig. 1. Schematic diagram of operation for components of measurement system: Whd – tested warhead, DelSys – timing system, OSC – oscilloscope, p(t)M – sensor(s) of pressure, ShdSS / ShkVelSS – (replaceable) units of short-circuiting plane sensors of the velocity of fragments, or sensors measuring the velocity of BW, SwTm – electronic time meter

Czujniki zwarciove umieszczane w odległości $3 \div 5$ mm od powierzchni bocznej głowicy inicjowały proces zliczania czasu (z dokładnością $1 \mu\text{s}$) przez miernik typu TM717 (produkcji ITWL), zaś poprzez układ synchronizujący wyzwały oscyloskop cyfrowy.

Wokół głowicy ustawiano zamiennie zespoły czujników mierzących prędkość (ShVelSS) lub nadciśnienie FU (p(t)M) – albo na powierzchni cylindrycznej, zespół tarcz przebijanych przez odłamki, służących do zliczania ich ilości i oceny rozmiarów. Zliczanie w kanałach pomiarowych miernika TM717 było zatrzymywane przez sygnały ze zwieranych przez odłamki czujników płaszczyznowych ShdSS przyklejonych do czołowych powierzchni tarcz lub z czujników ShVelSS zwieranych przez przechodzącą FU.

Oscyloskop rejestrował zmienne w czasie

Short-circuit sensors were placed at distance of $3 \div 5$ mm from the side surface of the head to initiate the counting of time (with accuracy of $1 \mu\text{s}$) by the meter TM717 (made by AFIT), and to trigger a digital oscilloscope via a timing system.

Around the head were set replaceable units of sensors to measure the velocity (ShVelSS) or the overpressure FU (p(t)M) – or, a system of shields on a cylindrical surface penetrated by the fragments for evaluating their number and size. Process of counting in the measurement channels of TM717 meter was stopped by signals coming from plane sensors ShdSS stuck to the front of shields and short-circuited by the fragments, or sensors ShVelSS short-circuited by the BW passing through.

Signals of overpressure $\Delta p(t)$ behind the

sygnały nadciśnienia $\Delta p(t)$ za frontem FU pochodzące z czujników $p(t)M$. Sygnały z czujników do urządzeń rejestrujących były przesyłane kablami koncentrycznymi o impedancji 50Ω .

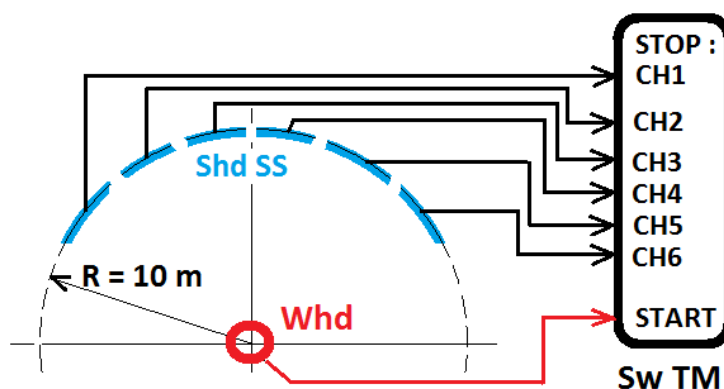
2.2. Badanie charakterystyk odłamków

Jednoczesny pomiar prędkości i rejestrację trafień odłamków prowadzono za pomocą zespołu 12 tarcz ze sklejki grubości 6 mm o wymiarach ok. $1 \text{ m} \times 1,5 \text{ m}$ każda, ustawionych w dwóch piętrach (2×6 sztuk) na pobocznicy cylindra o osi pionowej, w sposób pokazany na rys. 2 i 3 tak, że pokrywały w azymucie Θ w przybliżeniu sector $[-60^\circ, +60^\circ]$ (rys. 2) oraz w elewacji Φ $[-5,5^\circ, +11,5^\circ]$ (rys. 3). Wybrana odległość głowicy do tarczy $r = R = 10 \text{ m}$ zapewniała dół do tarcz odłamków i zwarcie czujników ShdSS przed ich przewróceniem przez falę uderzeniową.

front of BW and coming from $p(t)M$ sensors were changing in time and recorded by the oscilloscope. Signals from sensors were sent to the recording instruments via concentric cables of 50Ω impedance.

2.2. Testing Characteristics of Fragments

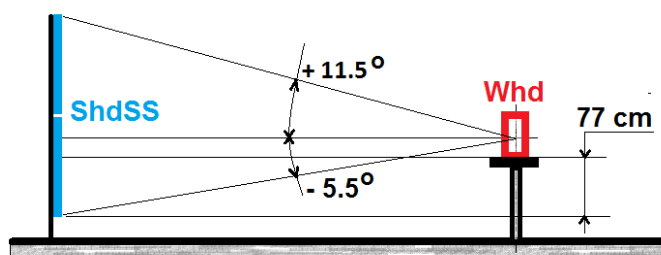
Measurement of velocity and recording of fragments incidence points was made simultaneously by using a set of 12 shields made from 6.0 mm thick plywood plates with dimension ca. $1 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ each, which were arranged in two levels (2×6 plates) on the surface of a vertical cylinder as shown in Fig. 2 and 3 to cover the sector in azimuth Θ $[-60^\circ, +60^\circ]$ (Fig. 2) and in elevation Φ $[-5,5^\circ, +11,5^\circ]$ (Fig. 3). Distance $r = R = 10 \text{ m}$ between the head and shield was chosen to provide reaching it by fragments and short-circuiting the sensors ShdSS before over-throwing it by the blast wave.



Rys. 2. Schemat stanowiska do pomiaru czasu dolotu odłamków do tarcz:

Whd – badana głowica, ShdSS – zespół tarcz – czujników zwarciovych,
SwTM – miernik czasów (CH1...CH6 – kanały rejestracji)

Fig. 2. Schematic diagram of the set-up for measuring the time needed for fragments to hit the shields: Whd – tested head, ShdSS – system of shields (targets) – short-circuiting sensors, SwTM – time meter (CH1...CH6 – recording channels)

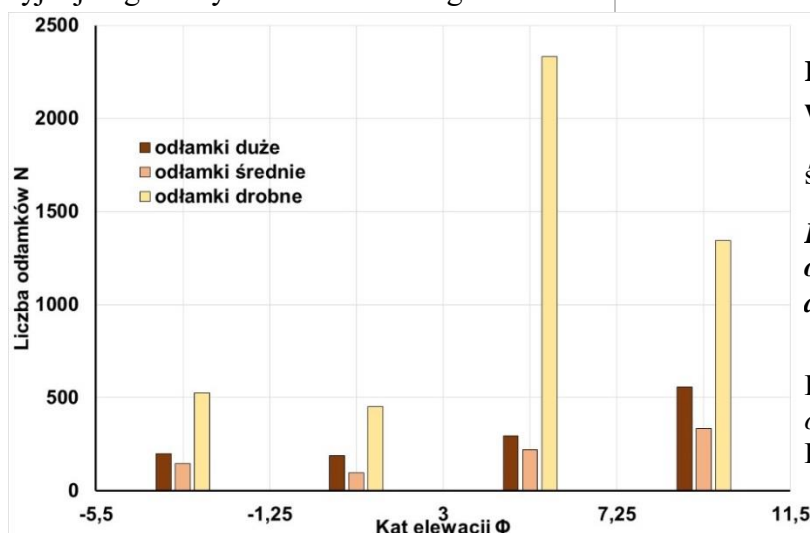


Rys. 3. Schemat rozmieszczenia tarcz względem głowicy (oznaczenia jak na rys. 2)

Fig. 3. Schematic diagram for arrangement of shields against the head (designations as in Fig. 2)

Po detonacji głowicy zliczano na tarczach przestrzeliny, segregując odłamki według maksymalnych rozmiarów ich przestrzelin d na duże ($d = 10 \div 30$ mm), średnie ($d = 2 \div 10$ mm) i drobne ($d < 2$ mm), z których znaczna część nie była w stanie przebić sklejki. Na tarczach nie znaleziono przestrzelin o wymiarach $d > d_{\max} = 30$ mm. Liczba przestrzelin w sektorach kąta elewacji Φ , w przeliczeniu na kąt pełny azymutu, przy założeniu symetrii obrotowej fragmentacji i rozlotu, została pokazana na rys. 4. Można zauważyć wzrost ilości wyrzucanych odłamków w kierunkach powyżej płaszczyzny poziomej, związany z propagacją fali detonacyjnej w głowicy na kierunku dół-góra.

Traces left by the fragments after detonation were counted and selected according to maximal sizes into large ($d = 10 \div 30$ mm), medium ($d = 2 \div 10$ mm) and fine ($d < 2$ mm) ones of most of which was not able to penetrate the plywood. Any trace with dimension $d > d_{\max} = 30$ mm was not found. Number of traces in sectors of elevation Φ is shown in Fig. 4 after recalculation into the full size azimuth and assuming the cylindrical symmetry of fragmentation and scattering. An increase of number of projected fragments may be noted into directions above the horizontal plane connected with propagation of detonating wave in the head in vertical direction.



Rys. 4. Rozkład liczby odłamków w sektorach kąta elewacji Φ : serie1 - odłamki duże, serie2 – średnie, serie3 – drobne

Fig. 4. Distribution of number of fragments in sectors of elevation angle Φ : Brown – large fragments, tiny red – medium, sandy – fine

Liczba odłamków – Number of fragments
 Kąt elewacji – Angle of elevation

Wyznaczona w tym układzie średnia prędkość najszybszych odłamków na początkowym dystansie $R = 10$ m wynosiła $v_{FBav} = 2100$ m/s

The mean velocity of fragments moving with the highest speed was determined in that system as equal to $v_{FBav} = 2100$ m/s at the ini-

z błędem maksymalnym 6%, przy czym średnie prędkości rejestrowane poszczególnymi czujnikami w sektorze azymutu 120° nie różniły się od siebie więcej niż o ok. 3%.

2.3. Badanie propagacji fali uderzeniowej w powietrzu

2.3.1. Osłona przeciwołamkowa czujników

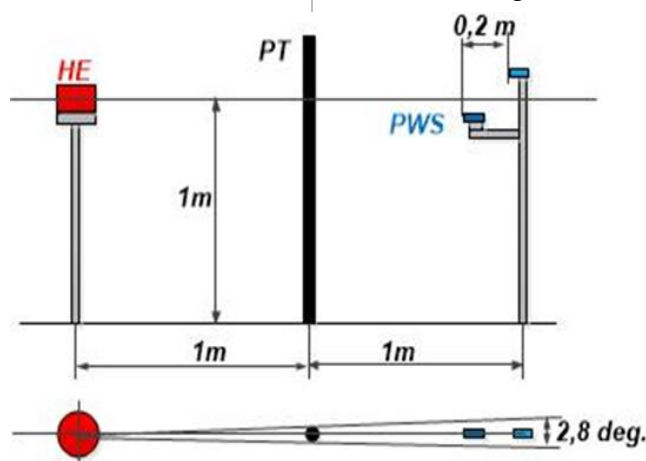
Osłonę czujników przed niszczącym działaniem odłamków stanowiła rura stalowa o zewnętrznej średnicy 50 mm i grubości ścianek 10 mm, wbita pionowo w ziemię przed rzędem czujników w odległości 1 m od głowicy. Aby sprawdzić, w jakim stopniu osłona zaburza propagację fali uderzeniowej przeprowadzono doświadczenie w schemacie pokazanym na rys. 5.

tial distance of $R = 10$ m at the maximal error of 6%, and the mean velocities recorded by particular sensors within the azimuthal sector 120° had the difference below ca. 3%.

2.3. Testing the Propagation of Blast Wave in the Air

2.3.1. Protection of Sensors Against Fragments

Protection of sensors against destructive action of fragments was provided by a steel tube with external diameter of 50 mm and 10 mm wall thickness, fixed vertically into the ground at the distance of 1 m from the head. In order to check a degree the protection disturbs the propagation of the blast wave the following experiment was made in configuration shown in Fig. 5.



Rys. 5. Szkic rozmieszczenia elementów układu pomiarowego:
HE – ładunek MW, PT – rura osłaniająca, PWS – czujniki piezoelektryczne
(zaznaczono kąt sektora osłony przeciwołamkowej)

Fig. 5. A layout for components arrangement in the measurement system:
HE – charge of explosive material (EM), PT – protective tube, PWS – piezoelectric sensors
(the angle of the sector protecting against fragments is marked)

Zamiast głowicy - z zachowaniem geometrii – zdetonowano dwukrotnie ładunek plastycznego MW o masie 300 g w odległości 2 m od zespołu PWS dwóch czujników przejścia typu FU-617 (produkcji ITWL), oddległych od siebie o $\Delta r_v = 0,2$ m (rys. 5), z któ-

A plastic charge of EM with mass 300g was detonated two times instead of head, at preserving geometry, in distance of 2m from the set of two passing sensors PWS of FU-617 type (made by AFIT) separated by $\Delta r_v = 0.2$ m (Fig. 5), and the first of them started

rych pierwszy załączał, a drugi zatrzymywał zliczanie czasu przez miernik czasu TM717. W pierwszym przypadku - bez zabudowanej osłony - czas przejścia FU pomiędzy czujnikami (na bazie 0,2 m) wynosił 392 μ s, w drugim - z osłoną - 393 μ s (różnica wartości zmierzonych mieści się w dokładności odczytu miernika), co odpowiada prędkościom FU odpowiednio 510,2 m/s i 508,9 m/s), pokazuje to, że wpływ rury osłonowej na propagację FU mógł być pominięty.

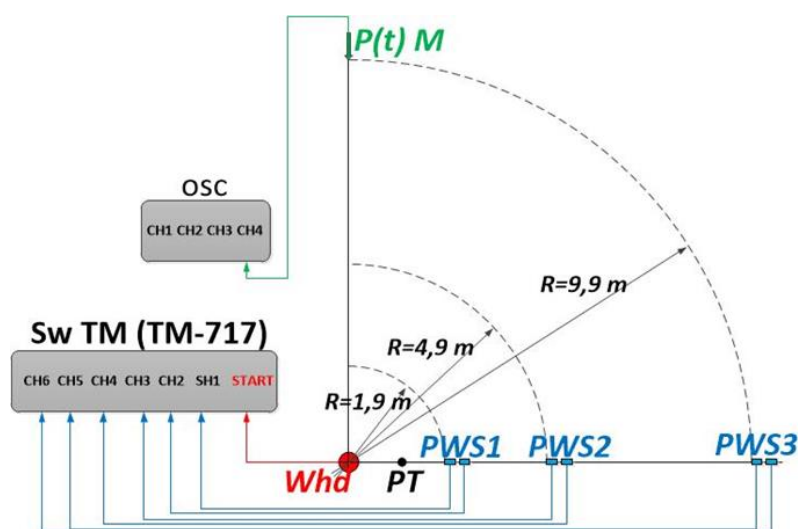
2.3.2. Pomiary prędkości fali uderzeniowej – wpływ odlamków

Badania prowadzono w układzie przedstawionym schematycznie na rysunku 6.

and the second stopped counting of the time by TM717 meter. In the first case – when the protection was missed – the passing time of the BW between the sensors (on the basis 0.2 m) was 392 μ s, and in the second case – with the protection - 393 μ s (the difference of measured values falls into accuracy of the meter) what corresponds to velocities of the BW 510.2 m/s and 508.9 m/s), respectively. It shows that influence of protecting tube into the propagation of BW could be omitted.

2.3.2. Measurements of Blast Wave Velocity – Influence of Fragments

Tests were carried out in the arrangement shown schematically in Fig. 6.



Rys. 6. Schemat stanowiska pomiarowego: Whd – głowica, PT – rura przeciwołamkowa, SwTM – miernik czasów, OSC – oscyloskop, p(t)M – czujnik ciśnienia, PWS1, PWS2, PWS3 – zespoły podwójnych czujników prędkości FU

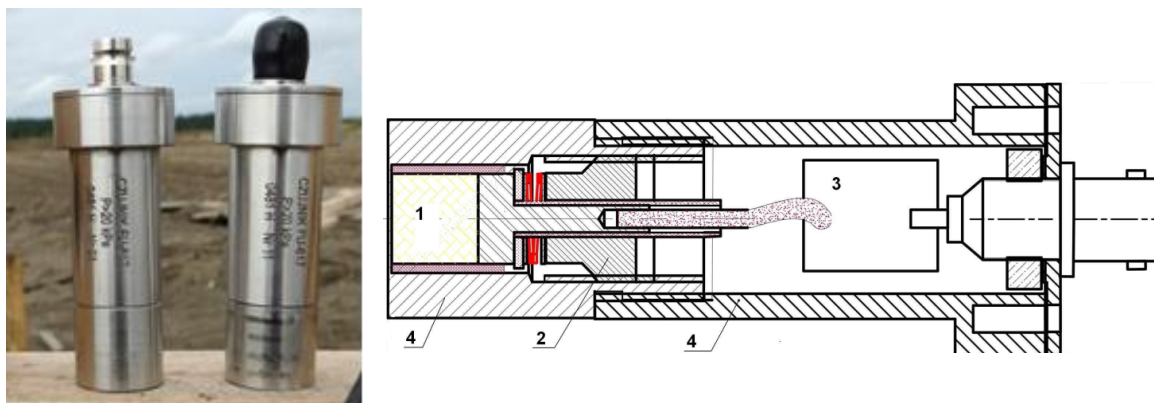
Fig. 6. Schematic of the measurement set-up: Whd – head, PT – tube against fragments, SwTM – time meter, OSC – oscilloscope, p(t)M – pressure sensor, PWS1, PWS2, PWS3 – sets of doubled sensors of the BW velocity

Prędkość FU mierzono wzdłuż promienia propagacji za pomocą zespołów PWS składających się z dwóch czujników piezoelektrycznych FU-617 (rys. 7) rozmieszczonych na bazie 200 mm (jak na rys. 5), ustawionych w odległościach 2, 5 i 10 m od podłużnej osi głowicy bo-

The velocity of BW was measured along the radius of propagation using sets of PWS containing two piezoelectric sensors FU-617 (Fig. 7) positioned on the base of 200 mm (as in Fig. 5), and located at distances 2, 5 and 10 m from the major axis of the warhead. The

owej. Powierzchnia czynna pierwszego z pary czujników znajdowała się w pozycji odpowiednio $R_1 = 1.9$ m, $R_2 = 4.9$ m, $R_3 = 9.9$ m (rys. 6).

active surface of the first sensor from each couple was placed respectively at $R_1 = 1.9$ m, $R_2 = 4.9$ m, $R_3 = 9.9$ m (Fig. 6).



Rys. 7. Widok ogólny i budowa czujnika powietrznej fali uderzeniowej FU-617:

1 - element z piezo-ceramiki, 2 – docisk, 3 – płytka elektroniczna, 4 – obudowa stalowa

Fig. 7. General view and structure of the air blast wave sensor FU-617:

1 – Component of piezo-ceramics, 2 – Clamp, 3 – Electronic plate, 4 – Steel frame

Impulsy nadciśnienia Δp związane z FU transformowane były na sygnały zwarcia przewodów koncentrycznych, połączonych na drugim końcu z odpowiednimi kanałami (CH1...CH6) miernika czasu TM 717. Sygnały te zatrzymywały zliczanie czasu w kanałach, które inicjował zwarciový czujnik startu bezpośrednio przy głowicy. Czujniki FU-617 charakteryzują się wysoką czułością (w tej serii reagowały na $\Delta p \geq 20$ kPa), szybką odpowiedzią (czas narastania < 1 μ s) oraz niskim kosztem wytworzenia.

Dla kontroli poprawności pomiarów jednocześnie rejestrowano profil czasowy nadciśnienia na froncie FU w punkcie $R = 10$ m za pomocą oprofilowanego („ołówkowego”) piezoelektrycznego czujnika ciśnienia firmy PCB Piezotronics o czasie narastania 6,5 μ s.

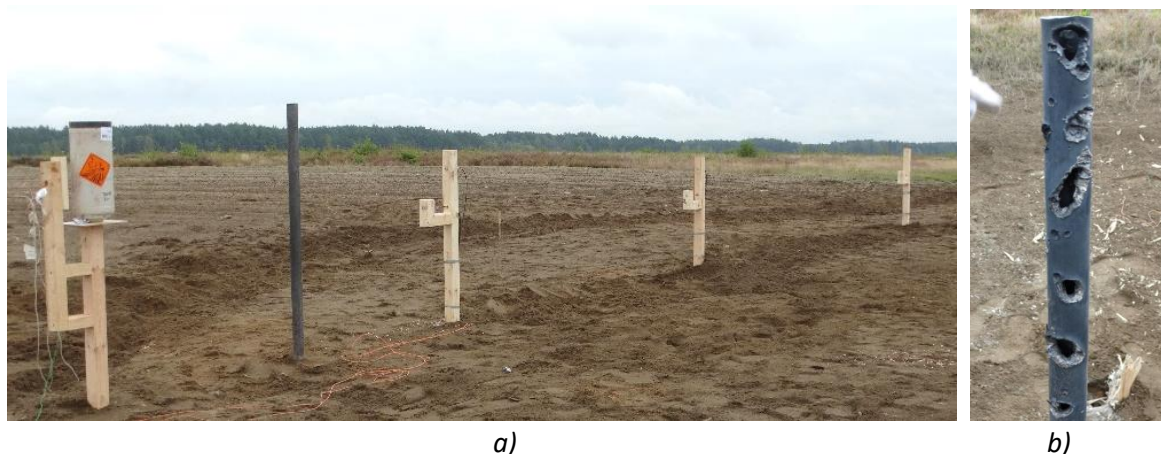
Rurę osłonową zabudowano przed rzędem czujników FU-617 w odległości 1 m od głowicy bojowej. Rozmieszczenie elementów stanowiska w terenie oraz wygląd rury po strzale ilustruje rys. 8. Zastosowanie

The overpressure surges Δp connected with the BW were transformed on short-circuit signals of concentric cables which were connected at the other end to respective channels (CH1...CH6) of time meter TM 717. These signals stopped the counting of time in channels which were started by the short-circuit sensor directly at the head. Sensors FU-617 are characterised by high sensitivity (in these trials they reacted to $\Delta p \geq 20$ kPa), rapid response (rise time < 1 μ s) and low cost of production.

A profiled (pencil-like) piezoelectric pressure sensor of PCB Piezotronics with the rise time 6.5 μ s was used at the same time to record the time profile of overpressure on the BW front at $R = 10$ m to check the correctness of measurements. The protecting tube was placed in front of the row of FU-617 sensors at distance of 1 m from the warhead. Arrangement of components of the set-up in terrain and the view of the tube after detonation is shown in Fig. 8. Application of protection in form of the

osłony w postaci grubościennej stalowej rury uchroniło czujniki przed zniszczeniem. O celowości zastosowania osłony świadczy stan osłony po wykonanej próbie (rys. 8b).

thick-wall steel tube prevented the sensors against destruction. Condition of the protection after the trial proves it was sensible to use it (Fig. 8b).

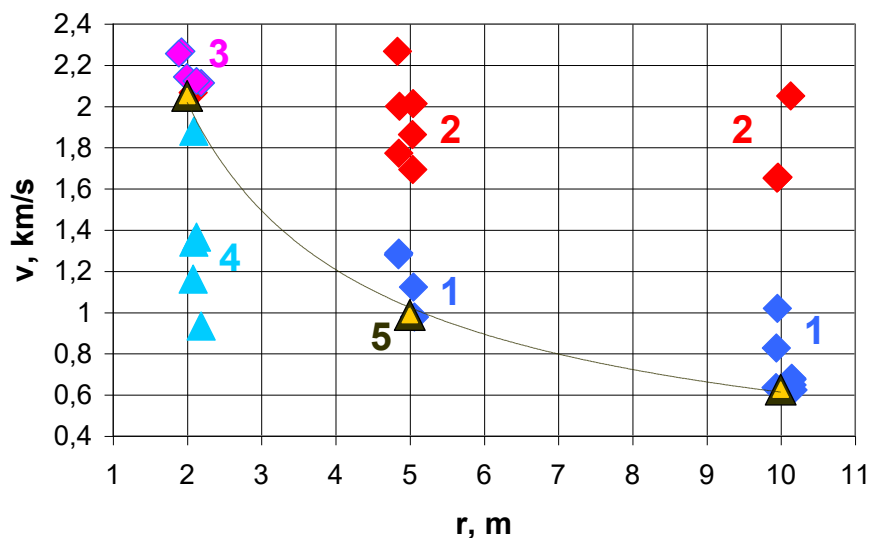


Rys. 8. a) Stanowisko do pomiaru prędkości frontu fali uderzeniowej - widok ogólny, b) stan osłony rurowej czujników pomiarowych po detonacji głowicy

Fig. 8. a) Set-up for measuring the velocity of the blast wave front – general view, b) state of the tube protecting the measurement sensors after detonation of the head

Przedstawione na rys. 9 wyniki pomiaru średnich prędkości na bazach $[R_i, R_i + \Delta r_v]$, $i = 1, 2, 3$ (rys. 6), obliczonych na podstawie czasów zarejestrowanych przez czujniki FU-617 w powyższym układzie dla kilku prób, pokazują istotny zaburzający wpływ przelatujących w pobliżu czujników odłamków. Niektóre z zarejestrowanych czasów przelotu do punktów $R_1 = 2$ m, $R_1 + \Delta r_v$ („4” na rys. 9), uznane za odpowiadające FU głowicy, dały średnią (z kilku strzałów) prędkość na bazie Δr_v wynoszącą 1,335 km/s, która po podstawieniu do wzoru (1) dała nadciśnienie 1,63 MPa na froncie FU.

Measurements results shown in Fig. 9 for mean velocities on bases $[R_i, R_i + \Delta r_v]$, $i = 1, 2, 3$ (Fig. 6) calculated from the times recorded by sensors FU-617 in the above arrangement for a few trials illustrate significant interferences of fragments flying near the sensors. Some of the recorded times of flying to the points $R_1 = 2$ m, $R_1 + \Delta r_v$ („4” in Fig. 9), accepted as corresponding to the head BW, gave the mean velocity (from a few detonations) on the base of Δr_v of 1.335 km/s, which was substituted to formula (1) to result in overpressure of 1.63 MPa on the BW front.



Rys. 9. Prędkości średnie według rejestracji za pomocą czujników FU-617:

- 1 – prędkości FU głowicy, 2 – prędkości fal generowanych przez przelatujące odłamki, 3 – prędkości wątpliwe: FU czy odłamek?, 4 – prawdopodobne prędkości FU głowicy na bazie Δr_v , 5 – prędkości średnie propagacji do punktów 2, 5 i 10 m z zapisów $\Delta p(t)$ w serii 2 (p.2.3.3)

Fig. 9. Mean velocities according to records from sensors FU-617:

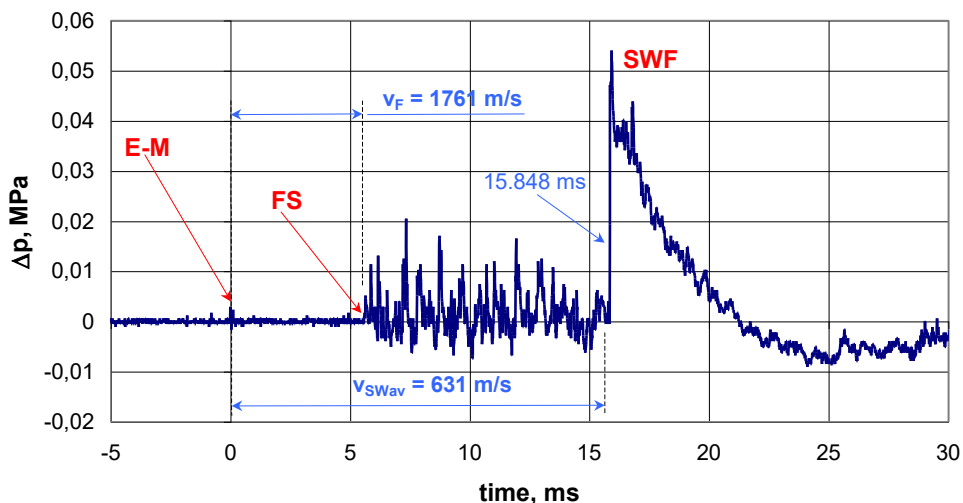
- 1 – velocities of the head BW, 2 – velocities of waves generated by flying by fragments, 3 – doubtful velocities: BW or fragment?, 4 – probable velocities of the head BW on the base Δr_v , 5 – mean velocities of propagation to points 2, 5 and 10 m from records $\Delta p(t)$ in series 2 (p.2.3.3)

Zakłócające oddziaływanie odłamków ilustrują przebiegi, zarejestrowane za pomocą nieosłoniętego czujnika PCB Piezotronics, umieszczonego na drewnianym statywie w odległości 10 m od głowicy. Na rys.10 i 11 sygnał frontu FU głowicy poprzedza uderzenie w statyw lub jego poblizko odłamka o prędkości ok. 1700 – 1800 m/s, natomiast na rys.12 oprócz tego zarejestrowano sygnały wygenerowane przez FU odłamków, przelatujących obok czujnika. Sygnały te pokazano dodatkowo na rys.13. Ich amplitudy, wynoszące: „F1” - 22 kPa i „F2” - 12 kPa, obrazują skalę spadku nadciśnienia wzdłuż stożka Macha, ciągniętego przez odłamek, którego trajektoria przebiegała w nieokreślonej odległości od czujnika. Amplitudy $\Delta p_{sw} \approx 40 \div 50$ kPa nadciśnienia FU głowicy są dość powtarzalne. Z powodu braku wystarczającej ilości bezpośrednich rejestracji czasów propagacji FU czujnikami FU-617 nie można było tych nadciśnień zweryfikować

The interferences caused by fragments are illustrated by signals recorded by unprotected sensor PCB Piezotronics placed on a wooden shaft 10 m from the head. In Fig. 10 and 11 the signal of head BW is before the fragment impacts the shaft or its vicinity with the velocity of ca. 1700 – 1800 m/s, whereas in Fig.12 beside that were recorded the signals generated by the fragment BWs flying by near the sensor. These signals are additionally shown in Fig. 13. Their amplitudes: „F1” - 22 kPa and „F2” - 12 kPa show the degree of overpressure diminishing along the Mach cone produced by the fragment with the trajectory positioned in unknown distance from the sensor. Amplitudes $\Delta p_{sw} \approx 40 \div 50$ kPa of head BW are quite repeatable. Because the number of direct recordings of BW propagation times by sensors FU-617 was insufficient, then it was not possible to verify these overpressures with the values calcu-

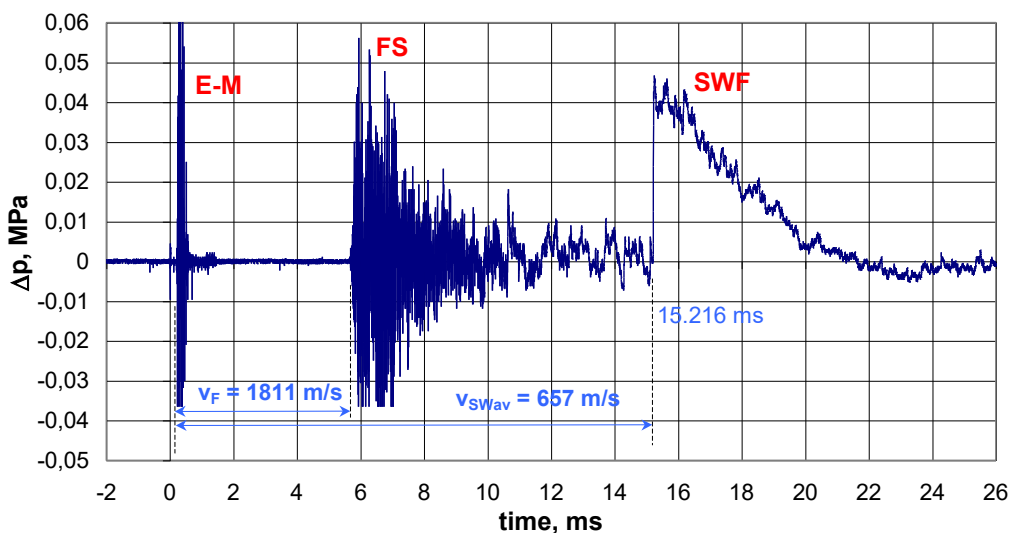
wartościami obliczonymi wzorem (1). Średnie prędkości FU na dystansie 10 m (631÷657 m/s) odpowiadają dolnym punktom z grupy “1” na rys. 9.

lated with formula (1). The mean velocities (631÷657 m/s) of BW on the distance of 10 m correspond to bottom points from group “1” in Fig. 9.



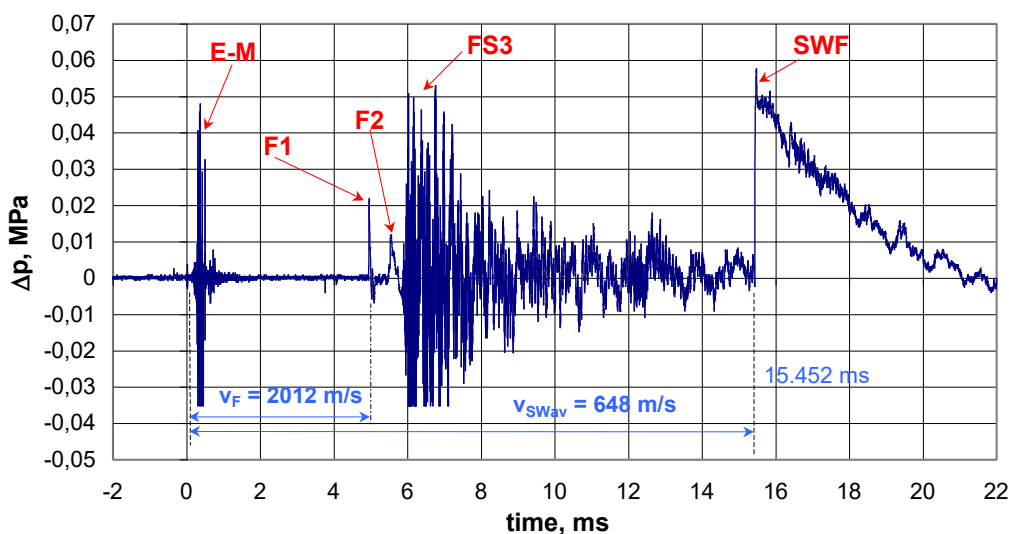
Rys. 10. Przebieg nadciśnienia w czasie w odległości 10 m od miejsca detonacji:
 E-M – sygnał indukowany przez zapalarkę, FS – uderzenie odłamka w statyw czujnika,
 SWF – front FU głowicy, v_{SWav} – średnia prędkość fali uderzeniowej

Fig. 10. Course of overpressure versus time at distance of 10 m from the place of detonation:
 E-M – signal induced by an igniter, FS – a hit of a fragment into the sensor’s shaft,
 SWF – front of the head BW, v_{SWav} – mean velocity of the blast wave



Rys. 11. Przebieg nadciśnienia w czasie w odległości 10 m od miejsca detonacji:
 E-M – sygnał indukowany przez zapalarkę, FS – uderzenie odłamka w statyw czujnika,
 SWF – front fali

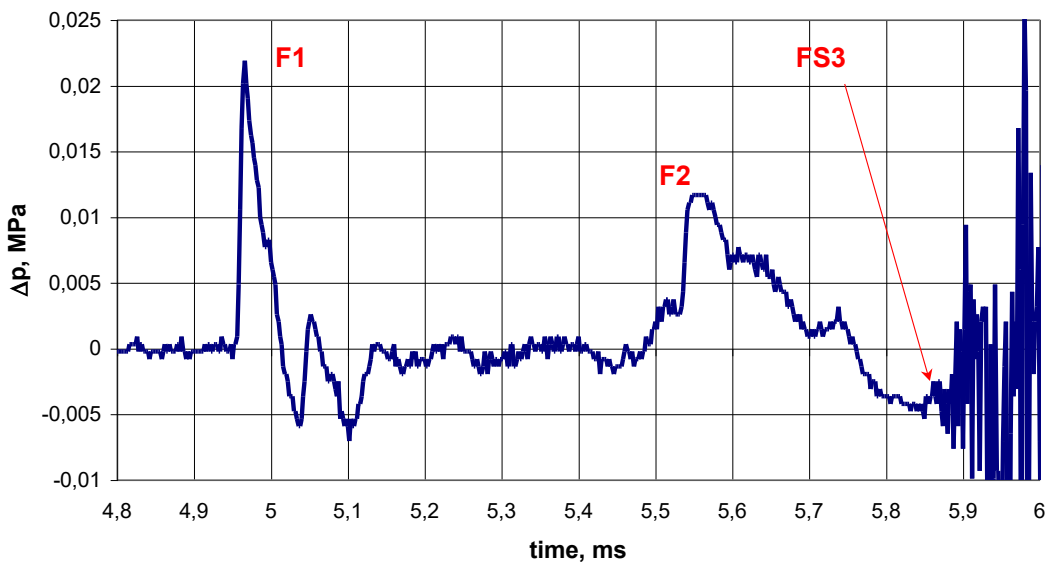
Fig. 11. Course of overpressure versus time at distance of 10 m from the place of detonation:
 E-M – signal induced by an igniter, FS – a hit of a fragment into the sensor’s shaft,
 SWF – front of the wave



Rys. 12. Przebieg nadciśnienia w czasie w odległości 10 m od miejsca detonacji:

E-M – sygnał indukowany przez zapalarkę, F1, F2 – fale uderzeniowe przelatujących odłamków, FS3 – uderzenie odłamka w statyw czujnika, SWF – front fali uderzeniowej, v_F – prędkość odłamka, v_{SWav} – średnia prędkość FU

Fig. 12. Course of overpressure versus time at distance of 10 m from the place of detonation:
E-M – signal induced by an igniter, F1, F2 – blast waves of fragments flying by, FS3 – a hit of a fragment into the sensor's shaft, SWF – front of the blast wave, v_F – velocity of the fragment, v_{SWav} – mean velocity of BW



Rys. 13. Wycinek przebiegu nadciśnienia w czasie (rys. 12) w odległości 10 m od miejsca detonacji obejmujący działanie odłamków: F1, F2 – fale uderzeniowe przelatujących odłamków, FS3 – uderzenie odłamka w statyw czujnika

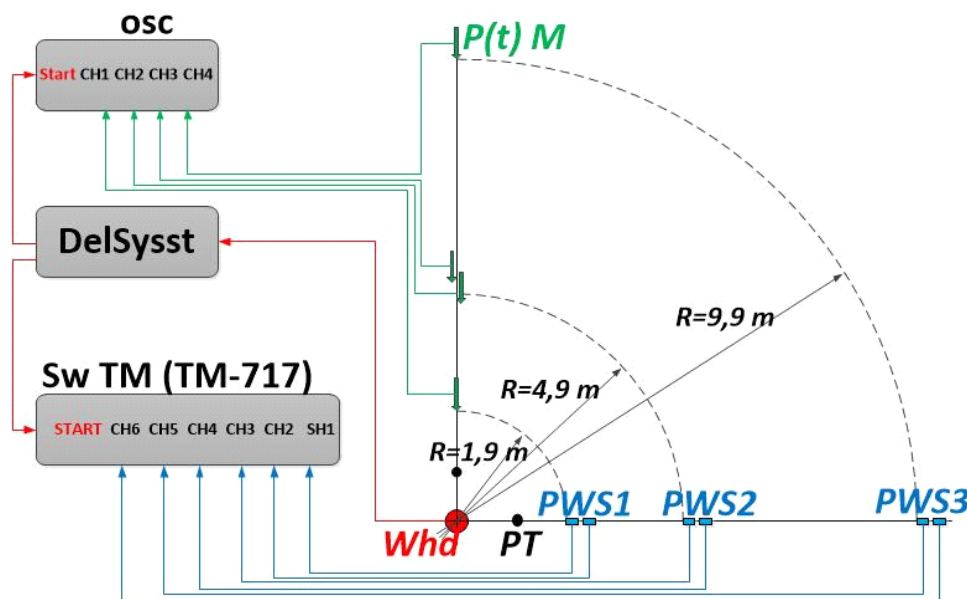
Fig. 13. A part of the course of overpressure versus time (Fig. 12) at distance of 10 m from the place of detonation including the action of fragments: F1, F2 – blast waves of fragments flying by, FS3 – a hit of a fragment into the sensor's shaft

2.3.3. Jednoczesny pomiar ciśnienia i prędkości

Zmodyfikowany schemat układu tej serii pomiarów przedstawiono na rys.14, wygląd układu w terenie – na rys. 15. Na dwóch wzajemnie prostopadłych gałęziach rozmieszczono w takich samych jak poprzednio odległościach R_1 , R_2 i R_3 zespoły PWS z czujnikami FU617 oraz czujniki PCB Piezotronics do bezpośredniego pomiaru ciśnienia, przy czym czujniki $p(t)M2$ i $p(t)M3$ znajdowały się jeden nad drugim w odległości 20 cm na wspólnym statywie. Obie gałęzie czujników zabezpieczono rurami osłonowymi przed odłamkami tak, jak w poprzednich eksperymentach.

2.3.3. Simultaneous Measurement of Pressure and Velocity

A modified diagram of the set-up used in this series of measurements is shown in Fig. 14 and its view in terrain in Fig. 15. The sets PWS with sensors FU617 and sensors PCB Piezotronics for direct measurement of the pressure were arranged in two mutually vertical directions and at the same as before distances R_1 , R_2 and R_3 , but the sensors $p(t)M2$ and $p(t)M3$ were placed now one above another on distance of 20 cm on one shaft. The two lines of sensors were secured by protecting tubes against the fragments like in former experiments.



Rys. 14. Schemat stanowiska pomiarowego:

Whd – głowica bojowa; PT – rura przeciwołamkowa, SwTM – miernik czasów; OSC – oscyloskop; DelSysst – blok synchronizujący; $p(t)M1$, $p(t)M2$, $p(t)M3$, $p(t)M4$ – czujniki ciśnienia; PWS1, PWS2, PWS3 – zespoły podwójnych czujników prędkości

Fig. 14. Schematic diagram of measurement set-up:

Whd – warhead; PT – anti-fragment tube, SwTM – time meter; OSC – oscilloscope; DelSysst – timing unit; $p(t)M1$, $p(t)M2$, $p(t)M3$, $p(t)M4$ – sensors of pressure; PWS1, PWS2, PWS3 – sets of doubled sensors of velocity

Wychodząc z poprzednich doświadczeń, czułość progową FU-617 na R_3 obniżono do

Considering the former experience the threshold sensitivity of FU-617 for R_3 was re-

30 kPa, na R_2 do 80 kPa, zaś na R_1 do 300 kPa. Pozwoliło to uwiarygodnić czasy zarejestrowane przez zespół czujników FU617 i miernika TM717 jako rzeczywiste czasy t_{FU} dotarcia FU do kolejnych czujników.

duced to 30 kPa, for R_2 to 80 kPa, and for R_1 to 300 kPa. It secured the times recorded by set of sensors FU617 and meter TM717 were more reliable, and were the real times t_{FU} for arriving of the BW to consecutive sensors.



Rys. 15. Widok poligonowego stanowiska w drugiej serii pomiarów: z lewej strony głowicy - gałąź czujników PWS do pomiaru prędkości FU; z prawej - gałąź czujników $p(t)M$ do pomiaru ciśnienia; przed obu gałęziami osłony rurowe PT osłaniające przed odłamkami

Fig. 15. View of the proving range set-up in the second series of measurements: from the left side of the head – line of sensors PWS for measurement of the BW velocity; on the right – line of sensors $p(t)M$ for measurement of the pressure; in front of two lines the protective tubes PT securing against the fragments

Przykładowe zestawienie przebiegów $\Delta p(t)$ w R_1 , R_2 i R_3 dla jednego ze strzałów pokazano na rys. 16, na którym zaznaczono czasy trwania dodatnich części impulsów nadciśnienia.

W oparciu o zarejestrowane czasy t_{FU} do lotu FU do kolejnych czujników FU617 można było postępować na dwa sposoby:

- A) bezpośrednio obliczać prędkości v_{SW} w punktach R_i na kolejnych bazach Δr_v
- lub
- B) zbudować trajektorię FU, aproksymując funkcją ciągłą zbiór jej punktów (R_i, t_{FU_i}) , $(R_i + \Delta r_v, t_{FU_{i+\Delta}})$ i liczyć v_{SW} w punktach R_i , posługując się pochodną tej funkcji, a następnie wartości v_{SW} przeliczać na nadciśnienie Δp_{SW} za pomocą wzoru (1).

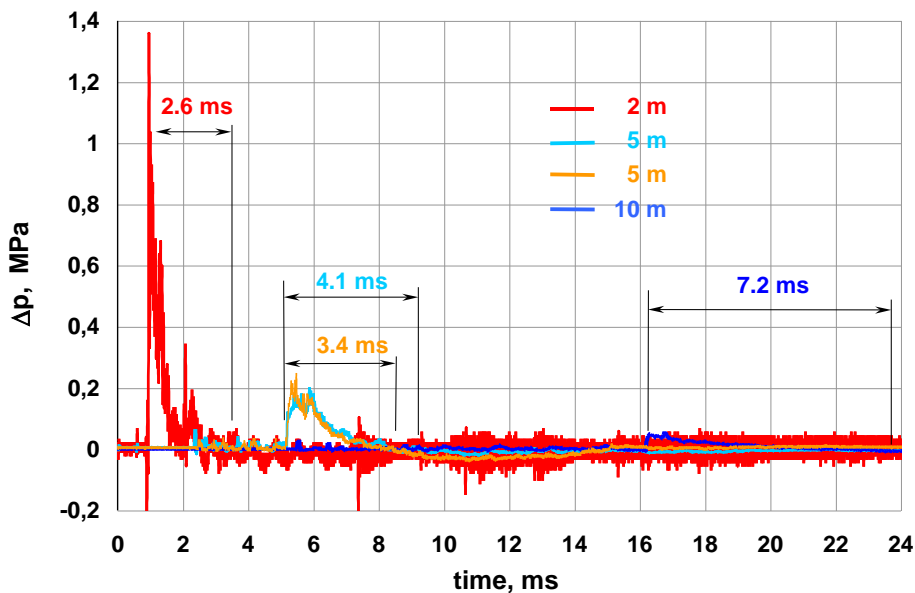
Fig. 16 shows an exemplary arrangement of signals $\Delta p(t)$ from R_1 , R_2 and R_3 for one of detonation where the duration times of positive parts of overpressure surges are marked.

On the basis of recorded times t_{FU} for arriving of the BW to following sensors FU617 two ways could be possible:

- A) calculate directly the velocities v_{SW} in points R_i for consecutive bases Δr_v
 - or,
 - B) build a trajectory of the BW by approximating the set of its points (R_i, t_{FU_i}) , $(R_i + \Delta r_v, t_{FU_{i+\Delta}})$ by a continuous function and calculate the v_{SW} in points R_i using derivative of the function, and next recalculate values v_{SW} to overpressure Δp_{SW} by formula (1).
- A function of dependence of the BW ve-

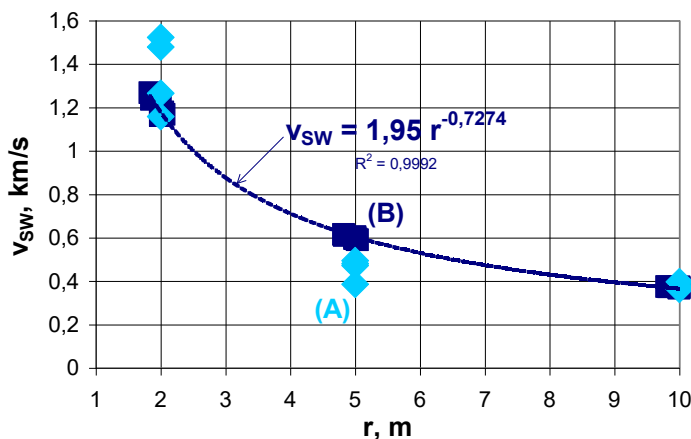
Funkcję zależności prędkości FU od promienia propagacji, uśrednioną dla kilku strzałów przedstawiono na rys. 17, na którym zamieszczono również wartości v_{SW} liczone metodą (A). Nadciśnienia, obliczone wzorem (1) dla tak wyznaczonych v_{SW} w funkcji r przedstawiono na rys. 18. Zamieszczono na nim też wartości Δp_{Mav} , uzyskane z czujników PCB. Widać, że najlepiej one zgadzają się z wartościami, obliczonymi metodą (B). Metoda (A) zawyża ciśnienia dla $r = 2$ m, zaniża dla $r = 5$ m; obie zaniżają je dla większych r w porównaniu z pomiarem czujnikami PCB.

Locality on the radius of propagation, averaged for a few detonations, is shown in Fig. 17, where the values of v_{SW} calculated by (A) method are shown, as well. Overpressures calculated from formula (1) for v_{SW} identified in such way are shown as a function of r in Fig. 18. Values of Δp_{Mav} received from PCB sensors are also included there. It can be noted that they fit best to the values calculated by (B) method. Method (A) increases the pressures for $r = 2$ m, decreases for $r = 5$ m; both decrease them for larger r comparing to measurements by PCB sensors.



Rys. 16. Przebieg nadciśnienia w czasie w odległości 2 m, 5 m i 10 m od miejsca detonacji - wykres zbiorczy; zaznaczono czasy trwania dodatnich części impulsów

Fig. 16. Course of overpressure versus time for distances 2 m, 5 m and 10 m from the place of detonation – an aggregated graph; duration times of positive parts of surges are marked

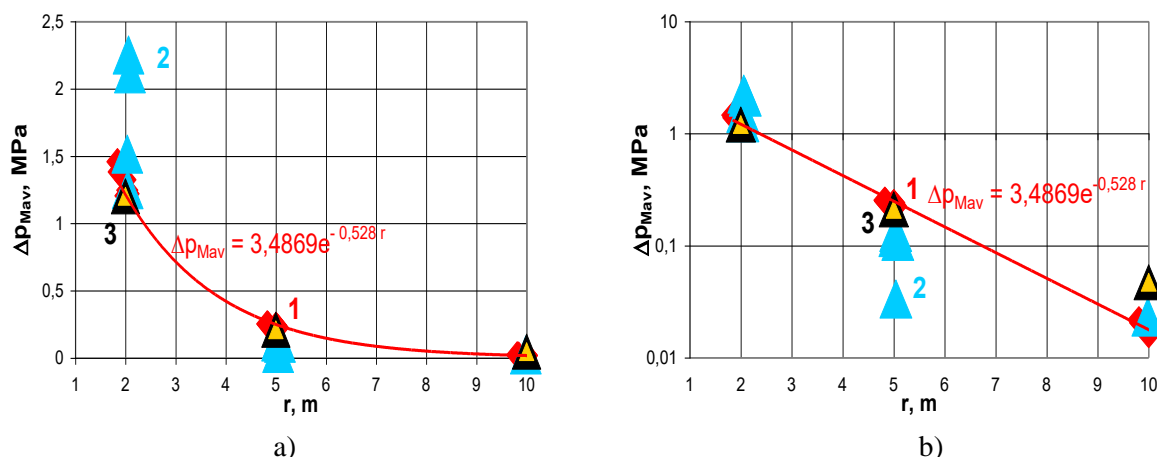


Rys. 17. Prędkość FU głowicy w funkcji odległości od epicentrum wybuchu:

(A) – bezpośrednio obliczenie prędkości na bazie 200 mm, (B) – prędkość jako pochodna po czasie trajektorii FU

Fig. 17. Velocity of head BW in function of distance from the blast epicentre:

(A) – direct calculation of velocity on the base of 200 mm, (B) – velocity as the time derivative of the BW trajectory



Rys. 18. Wartość nadciśnienia na froncie FU w funkcji odległości od epicentrum wybuchu: (a) – liniowa skala rzędnych, (b) – logarytmiczna skala rzędnych; 1 – ciśnienia obliczone wzorem (1) z prędkości FU wyznaczonych wariantem (B), 2 – to samo, wariantem (A), 3 – średnie z kilku strzałów wartości zmierzone czujnikami PCB

Fig. 18. Values of overpressure on the front of BW in function of distance from blast epicentre: (a) – linear scale of values, (b) – logarithmic scale of values; 1 – pressure calculated by formula (1) from velocities of BW identified by option (B), 2 – the same by option (A), 3 – average values from a few detonations measured by PCB sensors

Uśrednione po kilku strzałach wartości: Δp_M – maksimum nadciśnienia na froncie FU, τ_+ – czasów trwania dodatnich części impulsów w podanych punktach oraz v_{SW} – średnich prędkości doletu FU do czujników PCB zamieszczono w tabeli 1, wiersz Lp.1.

Wartości te porównano z oszacowaniami, jakich można dokonać w oparciu o przybliżone wzory dla wybuchu naziemnego (Epov, 1974) wiążące równoważnik trotylowy Q [kg] czystego (bez skorupy metalowej, dającej odłamki) wybuchu z nadciśnieniem na froncie FU w punkcie r [m] (wzór Sadowskiego):

$$\Delta p_M [\text{MPa}] = 0.106 (Q^{1/3} / r) + 0.43 (Q^{1/3} / r)^2 + 1.40 (Q^{1/3} / r)^3 \quad (2)$$

oraz z czasem trwania dodatniej części impulsu nadciśnienia

$$\tau_+ [\text{s}] = 0.0015 r^{1/2} Q^{1/6} \quad (3)$$

W szacowaniach pominięto energię kinetyczną odłamków z obu grubych den głowicy, jako dużo mniejszą od energii kinetycznej od-

Average values from a few detonations: Δp_M – maximal overpressure on the front of BW, τ_+ – duration times of positive parts of surges for given points, and v_{SW} – average velocities of arriving of the BW to sensors PCB are in table 1, line Lp.1.

The values were compared with the estimations which can be made using approximate formulae for the on the ground explosion (Epov, 1974), connecting the TNT equivalent Q [kg] of the pure (without a metallic shell producing the fragments) blast with the overpressure on the front of BW in point r [m] (Sadowski's formula):

and with the duration time of the positive part of overpressure surge

The kinetic energy of fragments originating from two thick bases of the head is omitted in the estimations as significantly lower

łamek z ścianek bocznych, oszacowanej na: | than from the side wall, estimated for:

$$E_F = \pi \times d_g \times h_g \times w_0 \times \rho_m \times v_{F0}^2 / 2 \approx 19.3 \text{ MJ}$$

$$\rho_m = 7800 \text{ kg/m}^3 \text{ (P.D.Yeh...raport SAND 2019)}$$

Wartość ta odpowiada zużyciu energii $Q_F \approx 4,8$ kg TNT o ciepłe reakcji $\epsilon_{0TNT} \approx 4$ MJ/kg (Knoepfel, 1972; Pulsed..., 1970). Z braku bliższych danych, dla wartości ciepła reakcji MW wypełniającego badane głowice przyjęto $\epsilon_{0MW} \approx 5$ MJ/kg, kierując się podobieństwem do mieszanin, (Knoepfel, 1972; Pulsed..., 1970; Trzeciński i in., 2008), więc jego równoważnik trotylowy wynosił $Q_{MW} = \epsilon_{0MW} \times m_{MW} / \epsilon_{0TNT} \approx 10$ kg TNT.

Energia, odpowiadająca różnicy $Q = Q_{MW} - Q_F \approx 5,2$ kg TNT jest energią, którą można przyjąć jako odpowiedzialną za wytworzenie wyłącznie FU, zaś Q jest równoważnikiem trotylowym, który pozwala określić parametry FU.

This value corresponds consumption of energy $Q_F \approx 4.8$ kg TNT with the heat of reaction $\epsilon_{0TNT} \approx 4$ MJ/kg (Knoepfel, 1972; Pulsed..., 1970). Without detailed data for values of the reaction heat of the EM filling tested heads it was accepted that $\epsilon_{0MW} \approx 5$ MJ/kg and regarding similarities to compositions Knoepfel, 1972; Pulsed..., 1970; Trzeciński et al., 2008), and finally its TNT equivalent was $Q_{MW} = \epsilon_{0MW} \times m_{MW} / \epsilon_{0TNT} \approx 10$ kg TNT.

Energy corresponding to the difference $Q = Q_{MW} - Q_F \approx 5.2$ kg TNT is the energy which can be accepted as exclusively responsible for production of BW, whereas Q is the TNT equivalent which may be used to identify parameters of BW.

Tabela 1. Parametry fali uderzeniowej uzyskane poprzez pomiar czujnikami PCB oraz szacowane
 Table 1. Parameters of the blast wave received from measurements by PCB sensors and estimated

Lp.	Q [kg]	r [m]	2	5	10
1	Pomiar / Measurement	Δp_M [MPa]	1,20	0,21	0,047
		τ_+ [ms]	3,22	3,73	6,8
		v_{sw} [km/s]	2,05	0,99	0,63
2	5,2 TNT	Δp_M [MPa]	1,32	0,15	0,040
		τ_+ [ms]	2,79	4,41	6,24
3	8,0 TNT	Δp_M [MPa]	1,94	0,20	0,050
		τ_+ [ms]	3,00	4,74	6,71

W tabeli 1 porównano wartości pomiarowe uzyskane w punkcie 2.3.3 (wiersz Lp.1) z wartościami Δp_M i τ_+ , obliczonymi wzorami (2) i (3) dla punktów pomiarowych $r = 2, 5$ i 10 m oraz $Q = 5,2$ i 8 kg TNT (wiersze Lp.2 i Lp.3). Równoważnik $Q = 5,2$ kg TNT przy szacowaniach dawał wyniki najbliższe wartościom doświadczalnym Δp_M oraz τ_+ z rys.16.

In table 1 the measured values received in point 2.3.3 (line Lp.1) are compared with the values Δp_M and τ_+ , calculated by formulae (2) and (3) for measurement points $r = 2, 5$ and 10 m and $Q = 5.2$ and 8 kg TNT (lines Lp.2 and Lp.3). The equivalent $Q = 5.2$ kg TNT gave the closest values at estimations to the experimental values Δp_M and τ_+ with fig. 16.

Wartości zbliżone do doświadczalnych przy szacowaniach utrzymywały się do $Q = 8$ kg TNT (z wyjątkiem za dużego Δp_M dla $r = 2$ m), jednak przyjęcie $Q = 8$ kg pociągałoby za sobą nierealną wartość $\varepsilon_{0MW} \approx 6.4$ MJ/kg (gdyby ładunek MW składał się z czystego HMX o $\varepsilon_{0HMX} \approx 5.68$ MJ/kg (Matys i in., 2012), $Q \approx 6,5$ kg TNT).

3. Podsumowanie

- 1) Stwierdzono istotny wpływ fal uderzeniowych generowanych przez przelatujące odłamki na wyniki pomiarów prędkości v_{SW} oraz amplitudy ciśnień Δp_{SW} fali uderzeniowej.
- 2) Zaprezentowano sposób pomiaru prędkości v_{SW} fali uderzeniowej za pomocą odpowiednio skonstruowanych czujników piezoelektrycznych (VSW); zweryfikowano sposób ochrony czujników przed zniszczeniem przez przelatujące odłamki; stwierdzono pomijalny wpływ zastosowanej metody ochrony czujników na wyniki pomiarów.
- 3) Określono zakres rozmiarów tworzonych przez głowicę odłamków i ich rozkład ilościowy w funkcji kąta elewacji względem osi podłużnej głowicy; zmierzono średnią prędkość najszybszych odłamków (2100 m/s) na początkowym odcinku 10 m.
- 4) Za pomocą dodatkowego czujnika piezoelektrycznego rejestrującego profil czasowy ciśnienia na froncie FU (PSW) pokazano wpływ fali uderzeniowej generowanej przez lecący odłamek na fałszywe zadziałanie czujnika VSW.
- 5) Poprzez jednoczesny pomiar czujnikami VSW i PSW określono rozkład

The estimated values were similar to experimental ones up to $Q = 8$ kg TNT (excepting a surge of Δp_M for $r = 2$ m), but taking $Q = 8$ kg would produce an unrealistic value $\varepsilon_{0MW} \approx 6.4$ MJ/kg (if the charge of EM was made of pure HMX with $\varepsilon_{0HMX} \approx 5.68$ MJ/kg (Matys i in., 2012), $Q \approx 6.5$ kg TNT).

3. Summary

- 1) It was stated that the blast waves generated by the flying by fragments have a significant influence into results of measurements for velocity v_{SW} and amplitude of pressure Δp_{SW} of the blast wave.
- 2) A method of measurement was presented for blast wave velocity v_{SW} by using piezoelectric sensors of special design (VSW); a method protecting the sensors against destruction by the flying by fragments was verified; it was stated that the method used for protection of sensors has a neglected impact into the measurement results.
- 3) The range of sizes for the fragments produced by the head and their numerical pattern in function of the elevating angle against the vertical axis was identified; the mean velocity of the quickest fragments was measured (2100 m/s) on the initial distance of 10 m.
- 4) Influence of the blast wave generated by the flying fragment into a false activation of VSW sensor was shown by using an additional piezoelectric sensor recording the time profile of the pressure on the front of BW (PSW).
- 5) Distribution of overpressure values Δp_{SW} on the front of the blast wave in function of distance from the epicentre of

wartości nadciśnienia Δp_{SW} na froncie fali uderzeniowej w funkcji odległości od epicentrum wybuchu głowicy i warunki poprawnego obliczania tych wartości z pomiarów VSW.

head explosion was identified by a simultaneous measurement employing the sensors VSW and PSW, together with conditions for proper calculations of these values from the measurements of VSW.

Literatura / Literature

- Catovic, A., Zecevic, B., Serdarevic-Kadic S., Terzic J. (2012). *Numerical Simulations for Prediction of Aerodynamic Drag on High Velocity Fragments from Naturally Fragmenting High Explosive Warheads*, Seminar on New Trends in Research of Energetic Materials, Pardubice.
- Epov, B.A. (1974). *Osnovy vzryvnogo dela*. Voen. Izdat. Moskva: Min. Obor. SSSR.
- Knoepfel H. (1972). *Sverksil'nye impul'snye magnitnye polya*. Moskva: Mir.
- Matys, Z., Powała, D., Orzechowski, A., Maranda, A. (2012). Metody otrzymywania oktogenu. *Chemik*, 66, 1.
- Mizerski, W. (2002). *Tablice fizyczno-astronomiczne*. Warszawa: Adamantan.
- Pulsed High Magnetic Fields*. (1970). Amsterdam-London: North Holland.
- Rościszewski, J. (1957). *Aerodynamika stosowana*. Warszawa: MON.
- Starczewski, L. (2017). *Badania fragmentacji naturalnej nowej drobnoziarnistej stali na kadłuby pocisków odłamkowo-burzących*. VI Konferencja Naukowo – Techniczna – Perspektywy Rozwoju Krajowej Produkcji Napędów Rakietowych oraz Amunicji Strzeleckiej i Artyleryjskiej, Kołobrzeg.
- Trzcíński, W.A., Chyłek, Z., Cudziło, S., Szymańczyk, L. (2008). Badanie parametrów detonacyjnych i wrażliwości flegmatyzowanych materiałów wybuchowych opartych na FOX-7. *Biuletyn WAT*, LVII, 3.
- Yeh, P.D., Potter, K., Martinez, C., Smith, M., Snider, C., Korbin, J., Attaway, S., *Predicting Fragment Aerodynamic Drag with Deep Learning*, raport SAND 2019-8771C.
<https://www.osti.gov/serv/ets/purl/1641364>.

