



**POMIAR TEMPERATURY DOPALANIA OBŁOKU PRODUKTÓW
WYBUCHU ZA POMOCĄ DWUZAKRESOWEJ FOTODIODY**
**MEASUREMENT OF EXPLOSION AFTERBURNING FIREBALL
TEMPERATURE BY DUAL-BAND PHOTODIODE**

Łukasz WIEJA

Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia, ul. Wyszyńskiego 7, 05-220 Zielonka
Military Institute of Armament Technology, 7 Wyszynski St., 05-220 Zielonka, Poland

Józef PASZULA

Wojskowa Akademia Techniczna, ul. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa 46
Military University of Technology, 2 Sylwestra Kaliskiego St., 00-908 Warsaw, Poland
Author's e-mail address: wiejal@witu.mil.pl.; ORCID: 0000-0002-7351-1552

DOI:10.5604/01.3001.0014.0854

Streszczenie: Istotnym parametrem podczas szacowania efektywności wybuchu mieszanin termobarycznych jest ich temperatura dopalania. W ramach niniejszej pracy dokonano przeglądu powszechnie stosowanych metod pomiaru temperatury dopalania obłoku produktów wybuchu, takich jak spektroskopia, pirometria optyczna, termowizja. Przedstawiono również metodę pomiaru ciągłego za pomocą dwuzakresowej fotodiody o zakresach pracy 400-1100 nm i 1000-1800 nm. Wysoka rozdzielczość czasowa tej metody pozwala na identyfikację szybkich zmian temperatury, wynikających na przykład z przejścia przez dopalający się obłok produktów wybuchu odbitej fali podmuchowej. Przedstawiono główne założenia metody oraz wyniki wstępnych pomiarów i porównano je z pomiarami spektrometrycznymi dla tych samych ładunków. Pomiary przeprowadzono dla mieszanin azotanu (V) amonu z aluminium i z PAM.

Słowa kluczowe: obłok produktów wybuchu, aluminizowane materiały wybuchowe, amonale, pomiary temperatury, fotodioda dwuzakresowa, spektroskopia

Abstract: A temperature of terminal combustion (afterburning) of thermobaric mixtures is an important parameter of explosion effectiveness. The paper reviews typical methods of spectroscopy, optical pyrometry, and thermovision for measuring the terminal combustion temperature of a fireball of explosion products. A method of continuous measurement by a dual-band photodiode operating on 400-1100 nm and 1000-1800 nm is presented. Method's high time resolution allows for the identification of rapid temperature changes resulting, for example, from the passage of a reflected blast wave through the fireball. The main assumptions of the method, the results of preliminary measurements and their comparison with spectrometric measurements for the same charges are presented. The measurements were carried out for mixtures of ammonium nitrate (V) with aluminum and with PAM.

Keywords: fireball, aluminized explosives, ammonals, temperature measurements, dual-range photodiode, spectroscopy

1. Wstęp

W wyniku wybuchu materiałów i mieszanin wybuchowych w otoczenie rozprzestrzeniają się produkty wybuchu o wysokiej temperaturze, które w wyniku wymieszania z powietrzem mogą podlegać reakcjom z tlenem. Szczególnie ważne jest to w przypadku wybuchu w ograniczonej przestrzeni. Dodatkowe reakcje dopalania powodują wzrost ciśnienia oraz temperatury produktów wybuchu. Procesy zachodzące podczas dopalania podlegają badaniom w celu określenia warunków, w jakich procesy te prowadzą do zwiększenia efektywności materiałów wybuchowych. W badaniach takich bardzo ważne są próby pomiaru temperatury obłoku produktów wybuchu. Ponieważ procesy te zachodzą stosunkowo szybko, metody pomiaru temperatury o dużej bezwładności układów pomiarowych nie mogą być stosowane. Dlatego też używane są metody wykorzystujące promieniowanie termiczne emitowane przez obłok produktów wybuchu oraz prawa opisujące ten proces.

1.1. Zjawisko dopalania produktów wybuchu

W procesie detonacji materiału wybuchowego o wysokim ujemnym bilansie tlenowym powstają niecałkowicie utlenione produkty detonacji, które podczas rozlotu w kontakcie z tlenem z otaczającego powietrza dopalają się, uwalniając dodatkowe ilości energii cieplnej. Energia ta powoduje wzrost efektywności działania materiałów wybuchowych. Podobne procesy zachodzą podczas detonacji materiałów wybuchowych o efektywności zwiększonej poprzez dodanie proszków metali lub materiałów wybuchowych termobarycznych. Kontakt rozproszonych wybuchem gorących cząstek z otaczającym tlenem z powietrza powoduje ich utlenienie i wydzielenie kolejnych porcji energii, które prowadzą do zwiększenia wydajności energetycznej materiału lub wystąpienia efektu termobarycznego. Przejawia się to znacznie przedłużonym czasem trwania do-

1. Introduction

At detonation of explosive materials and compositions the high temperature products of the blast are sent into surrounding space and after mixing with the air they may react with the oxygen. It is especially important when the detonation takes place in a limited space. Additional reactions of the secondary combustion (afterburning) build up the pressure and temperature of explosion products. Afterburning processes are investigated to find out the conditions enhancing the explosive materials efficiency. Attempts for measuring the temperature of a cloud of blast products are crucial in the investigations. As these processes run relatively quickly then temperature measurement methods of a high inertia cannot be deployed. For this reason the methods using the thermal radiation of the explosion products cloud and the principles describing the process are used.

1.1. Explosion Products Afterburning Effect

A detonation process of explosive material with a high negative oxygen balance generates incompletely oxidised products which after encountering the oxygen in the surrounding air are burnt out releasing additional portions of heat energy. This energy enhances the efficiency of explosive materials. Similar processes take place at detonation of explosive materials with efficiency boosted by an addition of powders of metals or thermobaric explosive materials. Contact of hot particles scattered by the blast with the oxygen included in the air makes them oxidise and produce following portions of energy what boosts the energetic efficiency of the material or produces a thermobaric effect. It is manifested by a significantly elongated duration time of the positive phase of overpres-

datniej fazy impulsu nadciśnienia w porównaniu do skondensowanych materiałów wybuchowych. Pomiar charakterystyk temperaturowo-czasowych rozlotu produktów wybuchu, dostarcza użytecznych informacji o tym procesie. Według autorów pracy (Lebel i in., 2013) charakterystyki takie umożliwiają ocenę efektywności oddziaływania wybuchu, a także ewaluację możliwości użycia wybuchu do rozproszenia czynników chemicznych, biologicznych bądź radiologicznych. Znajomość charakterystyki temperaturowo-czasowej pozwala na określenie efektywności tego rozpylenia, a także reakcji rozpylanego czynnika z obłokiem dopalających się produktów wybuchu. Dynamika zmian temperatury może dostarczyć informacji o przemianach fizykochemicznych i kinetyce tych przemian (Gogulya i in., 1999). Według autorów pracy (Mohamed i in., 2016) czas trwania całkowitego dopalania produktów wybuchu dla ładunku 2 kg TBX 6 (ładunek termobaryczny RDX/Al/ paliwo/chloran (VII) amonu/lepiszcze – 25/40/15/14/6) wynosi około 750 ms. W zależności od wielkości i rodzaju materiału użytego w danym ładunku czas trwania dopalania obłoku produktów wybuchu jest różny. Przykładowo dla ładunku 3,6 kg TNT w pracy (Goroshin i in., 2006), czas ten wynosi około 50 ms, a dla ładunku 1 kg uczulanego nitrometanu ponad 20 ms.

2. Przegląd wybranych metod pomiaru temperatury dopalania

W licznych pracach doniesiono o trudnościach występujących podczas pomiaru temperatury dopalania obłoku produktów wybuchu. Poza oczywistymi przeszkodami wynikającymi z występowania powietrznej fali podmuchowej, lub zakresu poziomu mierzonych temperatur i obecności gorących cząstek w produktach wybuchu, napotykaną są również przeszkody wynikające z dynamiki zjawiska i przeszkody natury optycznej. Wpra-

sure pulse comparing to solid explosive materials. The measurements of time-temperature scattering patterns for blast products provides useful data on the process. According to authors of (Lebel et al., 2013) these patterns can be used to assess the explosion killing zone, and also to evaluate if the blast can be used for scattering chemical, biological or radioactive agents. The knowledge of time-temperature characteristics can identify the effectiveness of the spreading, and the reaction of the spread agent with the cloud of afterburning products of explosion. The dynamics of temperature changes may provide information about physicochemical transitions and their kinetics (Gogulya et al., 1999). According to authors of (Mohamed et al., 2016) the time of complete burning out of the explosion products for the charge of 2 kg TBX 6 (thermobaric charge RDX/Al/ propellant/ammonium chlorine /binder – 25/40/15/14/6) is ca. 750 ms. Depending on the size and type of the material used in a given charge the afterburning times of the explosion products cloud are different. For instance, for the charge of 3.6 kg TNT in publication (Goroshin et al., 2006), the time was ca. 50 ms, and for the charge of 1.0 kg with sensitivity boosted by nitro-methane it was above 20 ms.

2. Review of Afterburning Temperature Measurement Methods

Numerous publications report difficulties faced at the measurement of temperature for burning out a cloud of explosion products. Leaving apart obvious difficulties caused by the existence of an air blasting wave, or by the range of measured temperatures and the presence of hot particles in the explosion products, there are also problems arising from the dynamics of the phenomenon and problems of optical

cach (Glumac i in., 2010; Lewis i in., 2013) zwrócono uwagę na wysoką gęstość optyczną, szczególnie w początkowej fazie powstawania obłoku dopalających się produktów wybuchu. Wysoka gęstość optyczna powoduje, że pomiar odnieść można tylko do pewnej głębokości na powierzchni. Według pracy (Glumac i in., 2010) głębokość ta jest rzędu centymetrów, co oznacza że pomiar dotyczy tylko temperatury na powierzchni obłoku dopalających się produktów wybuchu. Przedstawiono również problemy wynikające z nieznanego rozkładu gęstości i rozmiaru cząstek. W pracach (Glumac i in., 2010; Maiz i in., 2016) zwrócono uwagę na możliwość występowania innych reakcji na powierzchni obłoku w stosunku do reakcji zachodzących wewnątrz. Pomiar przy użyciu wrażliwego mechanicznie detektora wymaga odpowiedniego odseparowania i wprowadzenia izolacji, która może wpłynąć na wyniki pomiarów lub utrudnić ich interpretację. Dlatego bardzo często podejmowane są próby wykorzystania zdalnych metod pomiaru temperatury. Do metod takich zaliczyć możemy spektroskopię, pirometrię optyczną, termowizję, oraz pomiar z wykorzystaniem diody dwuzakresowej.

2.1. Spektroskopia

W artykule (Lebel i in., 2013) przedstawiono metodę pomiaru temperatury dopalania produktów wybuchu za pomocą spektrometru Ocean Optics USB2000+ VIS-NIR, którego elementem światłoczułym jest matryca CCD. Konfiguracja oprogramowania pozwala na rejestrację w czasie 1 milisekundy i zapis danych w czasie 2 milisekund. Wyjściowe dane rejestracji spektrometrem mają formę tabeli, przedstawiającej intensywność padającego promieniowania w danej długości fali (350÷1000 nm) i czasie. Wymagane jest wykonanie kalibracji spektrometru za pomocą lampy o promieniowaniu odpowiadającemu modelowi ciała doskonale czarnego w wyżej wymienionym zakresie długo-

character. Publications (Glumac et al., 2010; Lewis et al., 2013) stress a high optical density especially in the initial phase of creation of burning out cloud of explosion products. The high optical density makes the measurement may be referred according to (Glumac et al., 2010) only to a certain depth on the surface, order of centimetres, what means that the temperature is measured only for the cloud surface of afterburning products of explosion. The questions arising from the unknown density distribution of particles and their size were presented as well. Publications (Glumac et al., 2010; Maiz et al., 2016) note that the reactions on the surface of the cloud may be different than inside. The measurements using a mechanically sensitive detector require a special separation and introduction of insulation which may affect the result of measurement or may complicate their interpretation. For this reason the attempts are often taken to use remote methods for temperature measurements. Such methods include the spectroscopy, optical pyrometry, thermo-vision, and the measurement deploying a dual-range diode.

2.1. Spectroscopy

Paper of (Lebel et. Al., 2013) presents a method for measuring the afterburning temperature of explosive products by spectrometer Ocean Optics USB2000+ VIS-NIR using a CCD matrix as a light sensitive sensor. Configuration of software provides a recording at 1 millisecond and data storing within 2 milliseconds. The spectrometer recorded output data has a form of a table representing the intensity of an incident radiation for specific wavelengths (350÷1000 nm) versus the time. The spectrometer has to be calibrated by a lamp sending the radiation equivalent to a model of absolute black body on the above mentioned range of wavelengths. The cali-

ści fal. Kalibracja umożliwia wyznaczenie współczynnika czułości spektrometru, którego iloczyn z danymi pomiarowymi w odpowiadających długościach fal można dopasować do krzywej wynikającej z modelu ciała doskonale czarnego, co przedstawiono poniżej. Widmowa irradancja ciała doskonale czarnego wyraża się wzorem:

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_b T}} - 1} \quad 1)$$

gdzie: h jest stałą Plancka, k_b stałą Boltzmana, c – prędkością światła.

Przekształcenie powyższego wzoru w celu znalezienia dopasowania danych pomiarowych do modelu metodą Gaussa-Newtona:

$$B(\lambda) = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda}} - 1} \quad 2)$$

gdzie: c_1 i c_2 są współczynnikami dopasowania. Temperatura wyznaczona za pomocą spektrometru może być obliczona bezpośrednio ze współczynnika c_2 :

$$T_s = \frac{hc}{k_b c_2} = (14,388 \mu m) \cdot \frac{1}{c_2} \quad 3)$$

W artykułach (Maiz i in., 2016; Maiz i in., 2017a; Maiz i in., 2017b) z powodzeniem zastosowano przedstawioną metodę do pomiaru temperatury dopalania mieszanin termobarycznych w bunkrze i w komorze. Tej metody użyto również jako metody odniesienia dla pomiarów przedstawionych w poniższym artykule.

2.2. Pirometria optyczna

W pracy (Glumac i in., 2010) wskazano na największą popularność pomiaru temperatury dopalania się obłoku produktów wybuchu z wykorzystaniem pirometrów optycznych. Metoda ta często zestawiana jest ze spektroskopią (Goroshin i in., 2006) w celu

bration is used to establish the coefficient of sensitivity for the spectrometer, and its product with the measured data at the corresponding wavelengths may be fitted to the curve resulting from the model of absolute black body, what is presented below. The spectral irradiation of an absolute black body is expressed by equation:

where: h is the Planck constant, k_b is Boltzmann constant, c – light velocity.

The above relation is transformed to find out the fitting of measured data to the model by Gauss-Newton method:

where: c_1 and c_2 are the fitting coefficients. Temperature identified by the spectrometer may be calculated directly from the coefficient c_2 :

Presented method for measuring the afterburning temperature of thermobaric compositions in a bunker or chamber was successfully used in papers (Maiz et al., 2016; Maiz et al., 2017a; Maiz et al., 2017b). This method was also used as a referential method for the measurements presented in this paper.

2.2. Optical Pyrometry

Publication (Glumac et al., 2010) presents the optical pyrometers as a most popular device for measurement of afterburning temperature for a cloud of explosion products. The method is often compared with the spectroscopy (Goroshin et al.,

analizy widma emisyjnego i wyboru odpowiednich długości fal, w których nie występują niepożądane piki emisyjne, których obecność mogłaby wpłynąć na pomiar, czyniąc go całkowicie niemiarodajnym. Przebieg pomiaru polega na zarejestrowaniu promieniowania emitowanego przez mierzone obiekty, za pomocą głowicy optycznej, z której światłowodem następuje przesył promieniowania na poszczególne, zależnie od wybranych zakresów promieniowania, filtry i detektory. W pirometrze optycznym promieniowanie jest rozdzielane i filtrowane do postaci wąskich pasm, odpowiadających wybranym długościom fali (najczęściej dwóm lub trzem długościom- można w tych wypadkach mówić odpowiednio o pirometrii dwukolorowej i trójkolorowej). W takiej postaci następuje detekcja promieniowania za pomocą fotopowielacza. Analiza uzyskanych wyników opiera się o dokonanie kalibracji na podstawie modelu ciała doskonale czarnego (Goroshin i in., 2006) i lamp halogenowych o określonej temperaturze barwowej (Lebel i in., 2013; (Goroshin i in., 2006; Maiz i in., 2016). Dla ciała szarego widmo emisji jest funkcją ciągłą spełniającą prawo Plancka zależną od współczynnika emisyjności i temperatury. W związku z powyższym pomiar emisyjności dla dwóch długości fali pozwala na określenie temperatury ciała o emisji odpowiadającej modelowi ciała doskonale czarnego, a rozszerzenie pomiaru o trzecią długość fali pozwala również na określenie współczynnika emisyjności. W artykule (Lefrancois i in., 2002) przedstawiono pomiar na podobnej zasadzie dla sześciu długości fali, jednak ze względu na skomplikowanie układu pomiarowego i możliwość pojawienia się związanych z tym błędów, optymalnym jest użycie trzech różnych długości fali (Goroshin i in., 2006). W artykule (Feng i in., 2018) przedstawiono szczegółowo postępowanie obliczeniowe, pozwalające uzyskać wyniki temperatury za pomocą tej metody pomiaru – charakterystycznej dla pirometrii dwukolorowej.

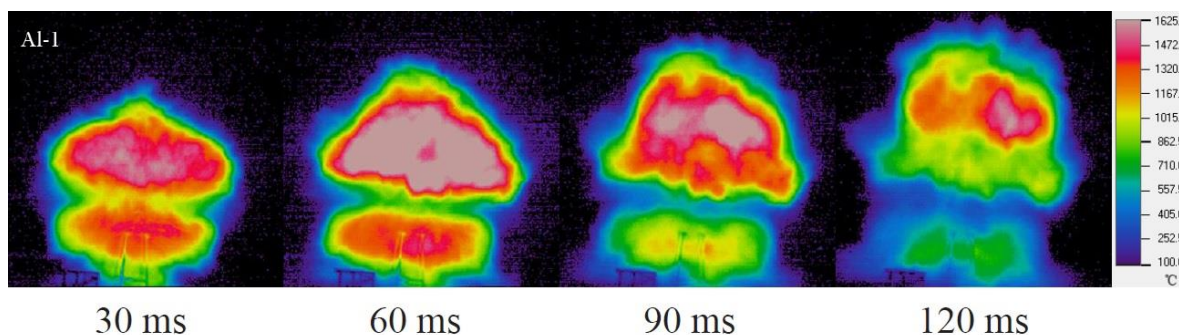
2006) to analyse the emission spectrum and to select appropriate wavelengths without the unwanted emission surges which could affect the measurement by rendering it completely unreliable. At the measurement, the radiation emitted by the investigated objects is recorded by an optical head, to be next transmitted via the optical fibres to particular filters and detectors depending on selected ranges of radiation. The radiation is separated and filtered inside the optical pyrometer on the narrow bands corresponding the selected wavelengths (usually two or three wavelengths – in such case we can say about two, or three colour spirometry). The radiation in such form is detected by a photomultiplier. The analysis of received results is based on the performed calibration using the model of absolute black body (Goroshin et al., 2006) and halogen lamps with the specific colour temperature (Lebel et al., 2013; (Goroshin et al., 2006; Maiz et al., 2016). For a grey body the spectrum of emission is a continuous function complying with the Planck law, and depending on the coefficient of emissivity and temperature. Concerning the above, the measurement of the emissivity for two wavelengths allows the determination of temperature of a body with the emission corresponding to the model of absolute black body, whereas the extension of the measurement by a third wavelength allows also the determination of the emissivity coefficient. The paper (Lefrancois et al., 2002) presents a measurement using a similar principle for six wavelengths, but due to complication of the measurement system and possibilities of errors related to it, the optimal solution recommends the use of three different wavelengths (Goroshin et al., 2006). A detailed calculating procedure presented in (Feng et al., 2018) can give the results of temperature by means of this measurement method – typical for dual-colour pyrometry.

2.3. Termowizja

W artykule [12] przedstawiono pomiar temperatury za pomocą kamery termowizyjnej. Zaletą tej metody jest możliwość określenia rozkładu temperatury zewnętrznych warstw obłoku dopalania produktów wybuchu na podstawie uzyskanego obrazu. Użyto kamery MikroScan 7200V firmy Mikron Infrared, o zakresie pomiarowym od 200 do 2000°C i zakresie widmowym od 8 do 14 μm (Micron, 2019). Badano między innymi ładunki o masie 500 gramów, o 36% zawartości RDX i 20% zawartości nadchloranu amonu, 35% zawartości aluminium i 9% zawartości innych dodatków. Gęstość metalizowanych ładunków wynosiła około 1,74 g/cm^3 . Użyto wyniki, przedstawione na rys.1.

2.3. Thermo-vision

Measurement of temperature by thermo-vision camera is presented in [12]. The method can use the received picture for determination of temperature distribution for external layers of the cloud of afterburning products of explosion. The camera MikroScan 7200V of Mikron Infrared company is used with the measurement range from 200 to 2000°C and the spectral band from 8 to 14 μm (Micron, 2019). Above all, the charges were tested with mass of 500 grams, comprising 36% of RDX, and 20% of ammonium perchlorate, and 35% of aluminium, and 9% of other additives. The density of metalized charges was ca. 1.74 g/cm^3 . Results, presented in Fig.1, were received.



Rys. 1. Wyniki pomiaru kamerą termowizyjną dla ładunku RDX/Al/AP o masie 500 g [12]
Fig. 1. Measurement results from thermal camera for charge RDX/Al/AP of 500 g mass [12]

Na przedstawionym rysunku wyraźnie widoczny jest przestrzenny rozkład temperatury obłoku, co w innych metodach często jest nieosiągalne. Niestety w artykule (Micron, 2019) nie zamieszczono informacji o sposobie wyznaczenia współczynnika emisyjności i jego wartości.

The figure shows clearly a spatial pattern of cloud temperature, what cannot be usually seen in other methods. Unfortunately, the paper (Micron, 2019) lacks any information about a method for identification of the emissivity coefficient and its value.

3. Pomiar temperatury za pomocą podwójnej fotodiody

W artykule (Gelfand i in., 2008) przedstawiono metodę pomiaru wykorzystującą fotodiody o specjalnej konstrukcji, w której dwie warstwy półprzewodnika umieszczone

3. Temperature Measurement by Dual-photodiode

Paper (Gelfand et al., 2008) presents a method employing a photodiode of a specific design where two semiconductor layers are placed each above the other. The

są jedna nad drugą. Warstwa górna pełni rolę filtra odcinającego prawie całe promieniowanie w określonym zakresie długości fali docierające do warstwy dolnej. Jako poszczególne warstwy wykorzystane są krzem i german. Warstwą górną jest krzem, będący równocześnie filtrem dla dolnej warstwy germanowej, absorbującym promieniowanie o długości fali mniejszej niż 1,1 μm . Autorzy artykułu podają również cechy jakie powinien mieć fotodetektor: liniowa charakterystyka odpowiedzi prądowej na promieniowanie padające, niski poziom szumu i duża szybkość odpowiedzi, wytrzymałość mechaniczna, niska masa i kompaktowość, trwałość i niski koszt, właściwa odpowiedź widmowa. Według autorów fotodiody dwuzakresowa spełnia powyższe wymagania dając jednocześnie możliwość pomiaru w dwóch zakresach widma, bez użycia dodatkowych układów optycznych (np. rozdzielających wiązki), w związku z ułożeniem obu warstw półprzewodnika na tej samej ścieżce optycznej. Zauważono wysoką zmienność strumienia świetlnego, aż do pięciu rzędów wielkości, co wymogło zastosowanie niskoszumnego i szybkiego przedwzmacniacza. Obliczenie temperatury polega na określeniu stosunku mocy strumienia świetlnego w różnych zakresach widma. Niestety nie wyjaśniono w pełni użytej metody obliczeniowej. Zwrócono uwagę na konieczność rozważenia obecności i wpływu pików emisyjnych i absorpcyjnych, w częściach widma promieniowania emitowanego podczas wybuchu, występujących w zakresach pracy poszczególnych warstw fotodiody. Kalibracja układu została przeprowadzona na podstawie Rosyjskiej Normy Państwowej (Russian State Standard). W artykule (Gelfand i in., 2008) zbadano następujące materiały wybuchowe: trotyl, RISAL – materiał typu TBX/EBX (mieszanina 29% heksogenu (krystaliczny), 53% azotanu izopropylu, 14,5% płatki aluminium 5 μm , 3,5% aerożelu; gęstość mieszaniny wyniosła 1.35 g/cm³, a prędkość detonacji 5,9 km/s). Wykonano pomiary dla ła-

upper layer is a filter cutting off almost whole radiation falling into the bottom layer on a specific range of wavelengths. Silicon and germanium are used as the particular layers. Silicon is the upper layer, and it is also the filter for the bottom germanium layer absorbing the radiation with the wavelengths below 1.1 μm . The authors of the paper also provide preferential characteristics of a photodetector: linear characteristics of current response against the incident radiation, low level of noise, high speed of reaction, mechanical resistance, low mass and compactness, durability and low cost, and appropriate spectral response. According to the authors the dual range photodiode meets the above mentioned specifications and it can be used at the same time for measurements in two bands of the spectrum without any additional optical systems (e.g. for splitting the beam) as two semiconductor layers are placed on the same optical path. A high dynamics of the light flux was noticed, up to five orders of magnitude, what enforced the deployment of a low noise and rapid preamplifier. The calculation of temperature is based on determination of the ratio for the light flux power for different bands of the spectrum. Unfortunately, the deployed method of calculations was not explained fully. The attention was paid for a need of considering the presence of emission and absorption peaks in some bands of the spectrum radiated at the explosion, occurring on the operational bands of particular layers of the photodiode. The calibration was made on the basis of the Russian State Standard. Following explosive materials were investigated in (Gelfand et al., 2008): trotyl, RISAL – material of TBX/EBX type (composition of 29% hexogen (crystal-like), 53% iso-propylene nitrate, 14.5% aluminium flakes 5 μm , 3.5% aerogel; the density of composition was - 1.35 g/cm³, and velocity of detonation – 5.9 km/s). The measurements were made for charges of 1 kg, in

dunków o masie 1 kg, w przestrzeni otwartej i zamkniętej. Przeanalizowano wyniki i stwierdzono, że temperatury dopalania produktów wybuchu mieszaniny RISAL są wyższe o około 200 K niż trotylu (w otwartej przestrzeni). W testach w przestrzeni zamkniętej osiągnięto temperaturę dla dopalania mieszaniny RISAL sięgającą maksymalnie wartości 2750 K (500 K więcej niż w przestrzeni otwartej), przy nieznacznym wpływie ograniczenia przestrzeni na temperaturę dopalania produktów wybuchu trotylu. Zauważono, że częstotliwość oscylacji temperatury w teście w przestrzeni ograniczonej, koresponduje z powtarzającym się przechodzeniem przez mieszaninę odbitych fal nadciśnienia. Podkreślono znaczny wpływ ograniczenia przestrzeni polegający na oddziaływaniu fal odbitych z dopalającą się mieszaniną RISAL, co skutkowało zwiększeniem efektu termobarycznego (przeprowadzono również pomiary fali podmuchowej).

3.1. Idea pomiaru

Na podstawie wyżej wspomnianych cech jako fotodetektor wybrano fotodiodeę FDG1010 DSD2 produkcji Thorlabs, Inc. Budowa fotodiody użytej do konstrukcji urządzenia pomiarowego odróżnia się od wyżej wspomnianej rodzajem wykorzystanego półprzewodnika (w artykule (Gelfand i in., 2008) drugą warstwę stanowił german (Ge), w tym przypadku arsenek indowo-galowy (InGaAs)). Najważniejszą charakterystyką fotodiody spośród dostarczonych przez producenta jest jej czułość prądowa \mathfrak{R} , przedstawiona na wykresie (rys. 2). Jest ona zależnością wygenerowanego w warstwie półprzewodnika prądu od mocy padającego promieniowania.

Dzięki tym charakterystykom można obliczyć, korzystając ze wzoru z karty katalogowej fotodiody (D2D2, 2019), moc P promieniowania w całym widmowym zakresie pracy fotodiody na podstawie uzyskanego

open and closed space. The analysis of results shows that the temperatures of the afterburning for explosive products of composition RISAL are higher by ca. 200 K than for trotyl (in open space). The temperature of afterburning at the closed space trials for composition RISAL has reached a maximum of 2750 K (500 K higher than in open space), whereas the trotyl explosion products afterburning temperature has been insignificantly affected by the limitation of the space. It was noted that the frequency of temperature oscillations in the limited space corresponds to the reflected overpressure waves propagating through the composition. There was stressed a significant impact of the space limitation on producing an interaction of reflected waves with the afterburning composition RISAL what has enhanced the thermobaric effect (the measurements of the blasting wave were also made).

3.1. Principle of Measurements

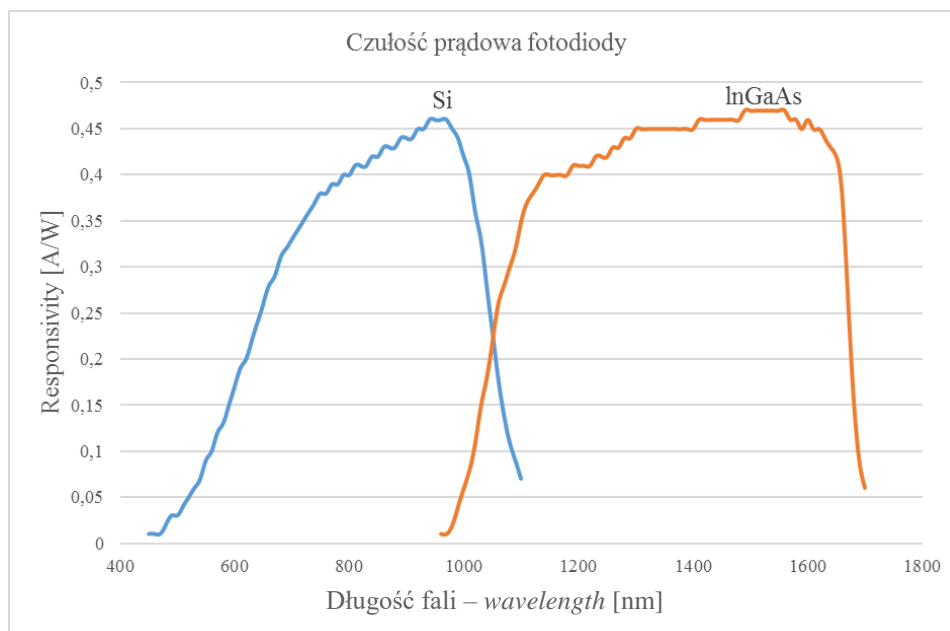
Basing on the above mentioned characteristics the photodiode FDG1010 DSD2 manufactured by Thorlabs, Inc. was selected as a photodetector. The design of the photodiode used in the measurement device deploys a different type of semiconductor than the one mentioned above (in (Gelfand i in., 2008) the second layer is made of germanium (Ge), and in this case it is the gallium-indium arsenide (InGaAs)). The most important characteristics of the photodiode provided by manufacturer is a plotted current sensitivity \mathfrak{R} (Fig. 2). It represents dependence of the current generated by the semiconductor layer on the power of incident radiation.

The characteristics can be used to calculate the power P of radiation for the overall spectral band of photodiode operation by using the expression taken from the photodiode catalogue card (D2D2, 2019), and the re-

napięcia V_o na rezystancji obciążenia R_L :

ceived voltage V_o measured on termination R_L :

$$V_o = P * \Re * R_L \quad 4)$$



Rys. 2. Czułość prądowa fotodiody Si-InGaAs [15]

Fig. 2. Current sensitivity of photodiode Si-InGaAs [15]

Tabela 1. Pozostałe charakterystyki fotodiody (D2D2, 2019)

Specyfikacja	Oznaczenie	Wartość	
		Si	InGaAs
Materiał detektora		Si	InGaAs
Widmowy zakres pracy	λ	400-1100 nm	1000-1800 nm
Długość fali w punkcie maks. czułości	λ_p	950 nm	1300 nm
Czułość	$\Re(\lambda)$	0,55 A/W	0,60 A/W
Średnica powierzchni światłoczułej	d	2,54 mm	1,50 mm
Czas narastania/opadania prądu fotoelektrycznego ($R_L=50\Omega$, 0 V, λ_p)	t_r/t_f	4,0 μ s	4,0 μ s
Moc promieniowania równoważna szumom, NEP (0 V, λ_p)	W/ \sqrt Hz	$1,9 \times 10^{-14}$	$2,1 \times 10^{-13}$
Prąd ciemny (1 V)	I_d	1 nA	0,5 nA
Pojemność (0 V)	C_j	450 pF	300 pF
Obudowa		TO-5	
Maksymalne napięcie polaryzacji (odwrócone)		5 V	2V

Table 1. Other characteristics of photodiode (D2D2, 2019)

Specification	Symbol	Value	
Material of detector		Si	InGaAs
Spectra range of operarion	λ	400-1100 nm	1000-1800 nm
Wavelength for maximal sensitivity	λ_p	950 nm	1300 nm
Responsivity	$\mathfrak{R}(\lambda)$	0.55 A/W	0.60 A/W
Diameter of light sensitive area	d	2.54 mm	1.50 mm
Build-up/dropping time of photoelectric current ($R_L=50\Omega, 0 V, \lambda_p$)	t_r/t_f	4.0 μ s	4.0 μ s
Noise equivalent power of radiation, NEP (0 V, λ_p)	W/ \sqrt Hz	1.9×10^{-14}	2.1×10^{-13}
Dark current (1 V)	I_d	1.0 nA	0.5 nA
Capacitance (0 V)	C_j	450 pF	300 pF
Casing		TO-5	
Maksimal voltage of polarisation (reversed)		5 V	2V

Opierając się o informacje dostarczone w karcie katalogowej fotodiody (D2D2, 2019) można wykorzystać wzór na wypromienowaną moc z jednostki powierzchni w danej temperaturze w danym zakresie długości fali P_i zdefiniować funkcję temperatury $f(T_f)$ jako iloraz napięć V na rezystancjach obciążenia Si i InGa:

Basing on data provided in photodiode catalogue card (D2D2, 2019) the relation expressing a power P radiated from the unit of surface at given temperature and for a given range of wavelengths may be used to define a function of temperature $f(T_f)$ as a quotient of voltages at load resistances of Si and InGa:

$$P = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} L(\lambda) d\lambda \quad 5)$$

$$f(T_f) = \frac{V_{Si}}{V_{InGa}} \quad 6)$$

Ponieważ iloraz napięć na poszczególnych diodach możemy wyrazić wzorem:

As the quotient of voltages on particular diodes may be expressed by relation:

$$\frac{V_{Si}}{V_{InGa}} = \frac{P_{Si} * \mathfrak{R}_{Si} * R_{L Si} * G_{Si}}{P_{InGa} * \mathfrak{R}_{InGa} * R_{L InGa} * G_{InGa}} \quad 7)$$

więc funkcja temperaturowa może być wyznaczona za pomocą wzoru:

then the function of temperature may be expressed by relation:

$$f(T_f) = \frac{\int_{\lambda_{Si\ min}}^{\lambda_{Si\ max}} (\mathfrak{R}_{Si}(\lambda) * L_{Si}(\lambda)) d\lambda * R_{L\ Si} * G_{Si}}{\int_{\lambda_{InGa\ min}}^{\lambda_{InGa\ max}} (\mathfrak{R}_{InGa}(\lambda) * L_{InGa}(\lambda)) d\lambda * R_{L\ InGa} * G_{InGa}} \quad 8)$$

gdzie: $\mathfrak{R}_o(\lambda)$ – czułość prądowa fotodiody w danej długości fali, stałe: $R_{L\ Si} = R_{L\ InGa} = 50$ [Ω] – rezystancja obciążenia, $G_{Si} = G_{InGa} = 50$ – wzmacnienie napięciowe sygnału, więc:

where: $\mathfrak{R}_o(\lambda)$ – current sensitivity of photodiode for a specific wavelength, constant values: $R_{L\ Si} = R_{L\ InGa} = 50$ [Ω] – resistance of the load, $G_{Si} = G_{InGa} = 50$ – voltage amplification of the signal, and then:

$$f(T_f) = \frac{\int_{\lambda_{Si\ min}}^{\lambda_{Si\ max}} \mathfrak{R}_{Si}(\lambda) * L_{Si}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{InGa\ min}}^{\lambda_{InGa\ max}} \mathfrak{R}_{InGa}(\lambda) * L_{InGa}(\lambda) d\lambda} \quad 9)$$

Dla bezpośredniego obliczenia temperatury utworzono dla funkcji $f(T_f)$ funkcję odwrotną w postaci:

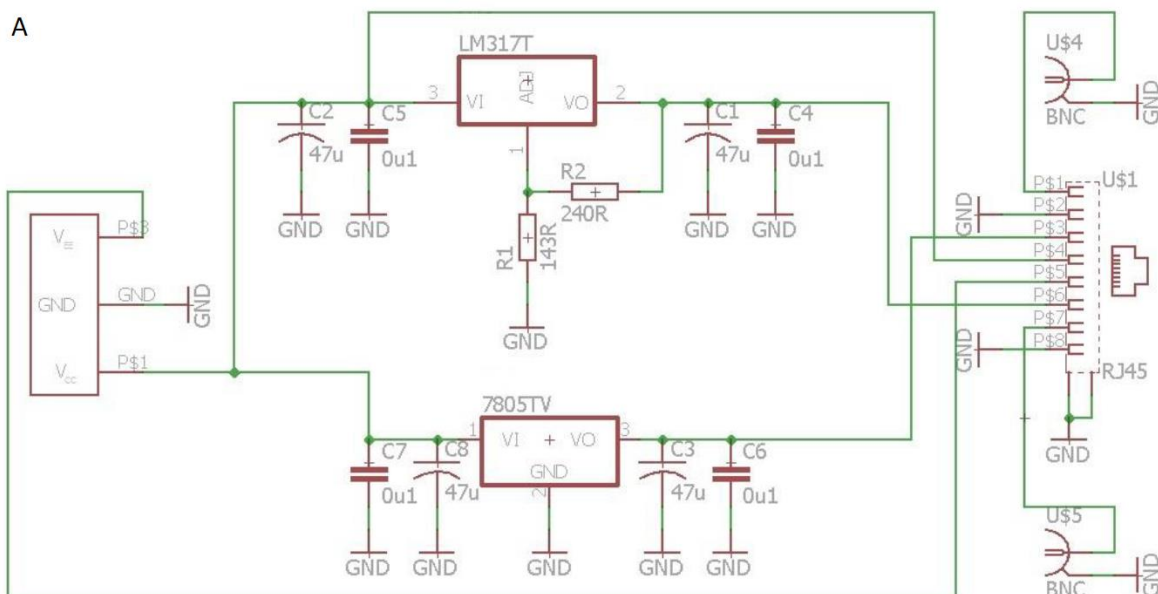
For direct calculation of the temperature a reverse function was created for the function $f(T_f)$ in the form:

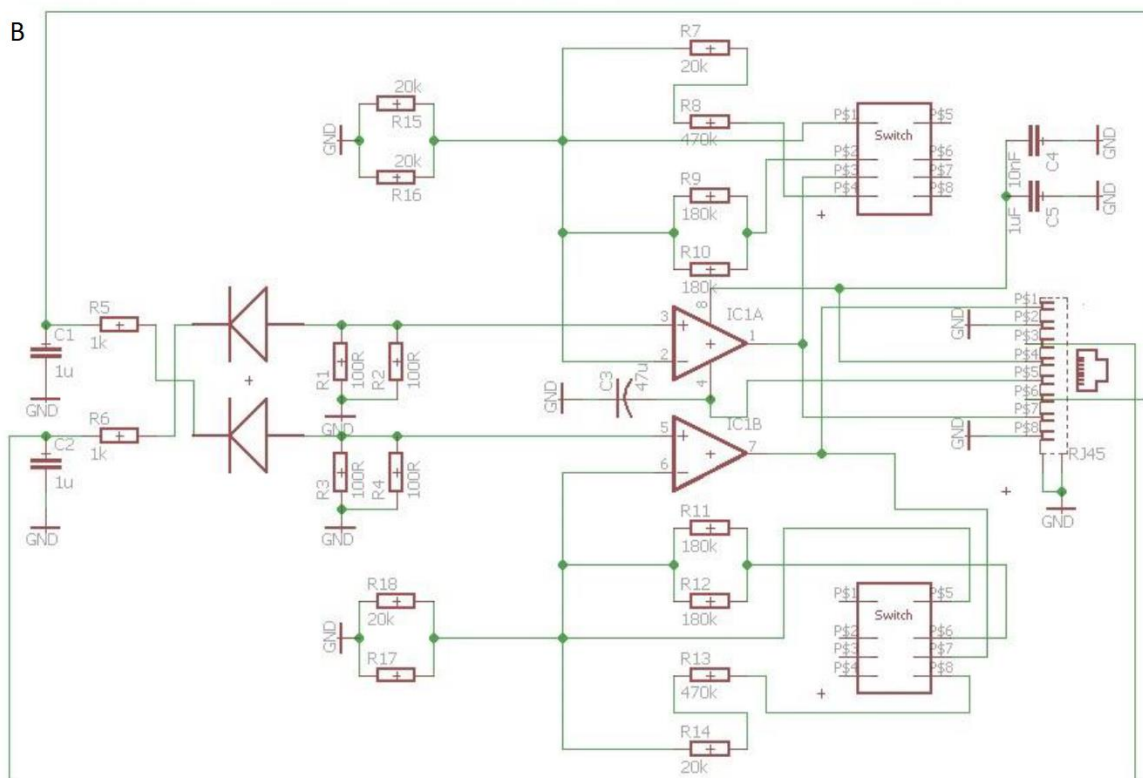
$$f_1\left(\frac{V_{Si}}{V_{InGa}}\right) = T_f \quad 10)$$

Wobec powyższego uzyskano wzór na wyznaczenie temperatury w oparciu o wskazania fotodiody dwuzakresowej:

Considering the above, a relation expressing the temperature on the basis of dual-range photodiode signals is received:

$$T_f = 444,7 \left(\frac{V_{Si}}{V_{InGa}}\right)^3 - 1279,1 \left(\frac{V_{Si}}{V_{InGa}}\right)^2 + 3153,8 \left(\frac{V_{Si}}{V_{InGa}}\right) + 1165,2 \quad 11)$$





Rys. 3. Schemat ideowy konstrukcji urządzenia do pomiaru temperatury dopalania produktów wybuchu za pomocą podwójnej fotodiody. Część zasilająca (A) i pomiarowa (B)

Fig. 3. Wiring scheme of the device structure for measuring afterburning temperature of explosive products by dual-photodiode. Powering part (A) and measurement part (B)

3.2. Konstrukcja urządzenia

Wykorzystując przedstawioną wyżej ideę autorzy skonstruowali urządzenie pomiarowe oparte o fotodiode FDG1010 DSD2. Urządzenie podzielono na dwie części (rys. 3) - pomiarową (B) i zasilającą (A). Zadaniem części pomiarowej jest sztywne umiejscowienie fotodiody w obudowie zabezpieczającej przed skutkami wybuchu, spolaryzowanie półprzewodnikowych części fotodiody i wzmocnienie sygnału przed przesłaniem do części zasilającej, której zadaniem jest zasilenie części pomiarowej i przekazanie sygnału na oscyloskop cyfrowy. Zasilenie układu i spolaryzowanie fotodiody zostało zrealizowane stabilizatorami liniowymi a wzmocnienie sygnału wykonano szybkim wzmacniaczem operacyjnym typu LM4562NA. Celem rozszerzenia możliwości

3.2. Design of the Device

A measurement device was designed by authors using the principle presented above and the photodiode FDG1010 DSD2. The device is divided on two parts (Fig. 3) - measurement (B) and power supply (A). The measurement part is aimed to fix steadily the photodiode in a housing protecting against the effects of explosion, and to polarise the electrodes of photodiode, and to amplify the signal before sending it to the supplying part, which is responsible for powering the measurement part and transmitting the signal to a digital oscilloscope. The polarisation of photodiode and powering of the system are provided by linear stabilisers, and the signal is amplified by a rapid operational amplifier of LM4562NA family. The amplification of the voltage

pomiarowych przygotowano przełączane wzmocnienie sygnału napięciowego, o wartościach: 1, 50, 100.

3.3. Kalibracja urządzenia

Na podstawie podejścia teoretycznego przedstawionego w rozdziale 3.1 uzyskano temperatury korelujące w czasie położeniem maksimów z pomiarami spektrometru, jednak o temperaturze regularnie zawyżonej średnio o około 600 K. Z tego powodu w drugim etapie obliczeń przeprowadzono eksperymentalną kalibrację wskazań fotodiody do wartości temperatury wyznaczonej na podstawie wskazań spektrometru. Pomiar temperatury spektrometrem przeprowadzono w celach referencyjnych metodą opisaną powyżej. Różnice mogą wynikać z innej niż podana przez producenta charakterystyki fotodiody zainstalowanej w urządzeniu lub nieuwzględnionych, nieznanych czynników. W celu wykonania kalibracji fotodiodowego miernika temperatury przeprowadzono analizę korelacji wskazań temperatury uzyskanej za pomocą spektrometru i fotodiody. Dla sprawdzenia wzajemnej korelacji danych uzyskanych z pomiarów odniesienia wykonanych spektrometrem obliczono iloraz temperatury zmierzonej spektrometrem i temperatury fotodiody (średniej temperatury fotodiody w czasie rejestracji widm spektrometrem) z podejścia teoretycznego: T_s/T_f . Zestawiając ten iloraz w dziedzinie T_f można zbadać korelację. W związku z wystąpieniem korelacji można zapisać:

$$\frac{T_s}{T_f} = 30,40 * T_f^{-0,478} \quad (12)$$

Powyższą zależność wykorzystano jako kalibrację temperatury obliczonej na podstawie wskazań fotodiody (T_f). Wówczas temperaturę obłoku T można wyznaczyć za pomocą wzoru:

$$T = 30,40 * T_f^{0,522} \quad (13)$$

signal may be switched gradually by 1, 50, 100 to extend the measurement performance.

3.3. Calibration of the Device

Basing on theoretical approach of subsection 3.1 there were received the temperatures correlating in time the positions of maximal values with the spectrometer measurements, but with the temperature which is regularly greater by ca. 600 K on average. For this reason at the second stage of calculations an experimental calibration of photodiode indications has been carried out to normalise them with the values of temperature measured by the spectrometer. Temperature was measured by the spectrometer by the method described above to be used as reference. The differences may arise from a different diode characteristics provided by manufacturer than installed in the device, or from other uncounted and unknown reasons. In order to calibrate the photodiode temperature meter the correlation of temperature indications received from the spectrometer and photodiode was analysed. The quotient of temperature T_s/T_f measured by the spectrometer and the photodiode (average temperature of photodiode during the registrations of the spectra by the spectrometer) at the theoretical approach was calculated to compare the mutual correlation of data received at referential measurements by the spectrometer. Arranging this quotient in domain of T_f the correlation may be analysed. The occurrence of correlation gives:

The above dependence was used for calibration of temperature calculated on the base of photodiode indications (T_f). Then the temperature T of the cloud may be established from the equation:

3.4. Wybrane materiały wybuchowe

Do zbadania wybrano ładunki amonalu, z rozmiarem ziaren saletry poniżej 1 mm o zmiennej zawartości proszku aluminium w zakresie od 3 do 7% i o zmiennej zawartości proszku stopu aluminium magnezowego (50Al/50Mg, PAM) (Benda-Lutz, 2003) w zakresie 10-20%. Mieszanki te elaborowano do pojemników wykonanych z 350 mm rur z PCW o średnicy 46 mm. Do pomiaru prędkości detonacji umieszczano w rurach 4 czujniki zwarciove wykonane ze skręconego drutu miedzianego w izolacji. Ładunki detonowano z użyciem pobudzacza, w bunkrze o objętości około 40 m³. Przygotowano ładunki przedstawione w tabeli 2.

3.4. Selected Explosive Materials

Ammonal charges were chosen for investigations, with the size of ammonium nitrate grains below 1.0 mm, and with changeable contents of aluminium powder from 3 to 7%, and aluminium-magnesium alloy powder (50Al/50Mg, PAM) (Benda-Lutz, 2003) between 10-20%. These compositions were put into containers made from 350 mm PCW tubes with diameter 46 mm. The velocity of detonation was measured by placing 4 shorting sensors made from twisted insulated copper wires. The charges were detonated by an initiator inside a bunker with capacity of ca. 40 m³. Prepared charges are shown in table 2.

Tabela 2 / Table 2

L.p. #	Zawartość aluminium <i>Aluminium content</i> [%]	Zawartość PAM <i>PAM content</i> [%]	Gęstość <i>Density</i> [g/cm ³]	Prędkość detonacji <i>Velocity of detonation</i> [m/s]
1	3	10	0,82	2964
2	7	15	0,82	2872
3	7	15	0,82	2796
4	7	20	0,84	2551

Na rysunku 4 przedstawiono schemat bunkra i umiejscowienia urządzeń.

The layout of the bunker and arrangement of instruments is shown in Fig. 4.

4. Wyniki pomiarów

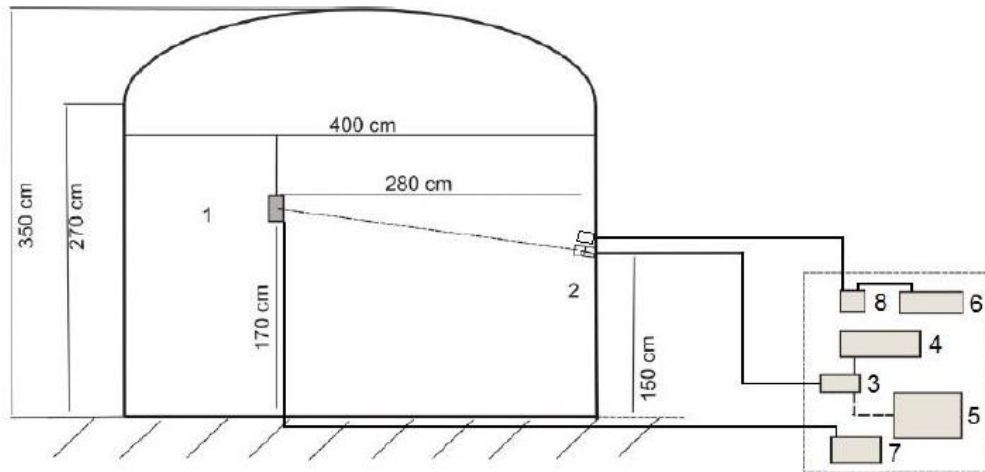
Wyniki zmiany napięcia w czasie dla pomiaru dopalania produktów wybuchu ładunków 1 i 3 przedstawiono na rysunku 5.

Przeprowadzono postępowanie obliczeniowe na podstawie metody opisanej w rozdziale 3.1. Dla referencji wykonano równoczesny pomiar spektrometrem (widma na rysunku poniżej). Obliczenia temperatury zrealizowano według postępowania z rozdziału 2.1.

4. Measurement Results

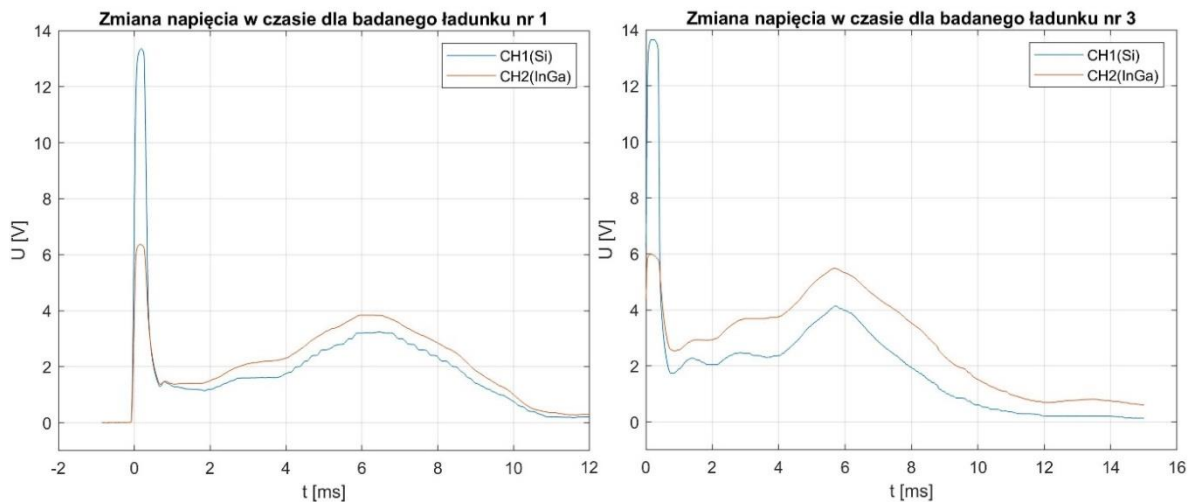
Results of voltage changes versus time at afterburning measurements of detonation products for charges 1 and 3 are presented in Fig. 5.

The calculations were performed according to the method presented in subsection 3.1. Concurrent spectrometer reference measurements were made (spectra in the picture below). The temperature was calculated along procedure from subsection 2.1.



Rys. 4. Schemat bunkra, w którym przeprowadzano pomiary (widok z boku) i schemat ideowy podłączenia urządzeń pomiarowych: 1- ładunek wybuchowy, 2- czujnik spektroskopu i fotodiody, 3 - spektrometr, 4 - urządzenie wyzwalające pomiar spektrometru, 5 - komputer, 6 - oscyloskop, 7 - miernik czasu, 8 - część zasilająca układu (na podstawie Maiz, 2016)

Fig. 4. Layout of the bunker where the measurements were made (side view) and wiring scheme of interconnections between the instruments: 1 - explosive charge, 2 - spectroscopy sensor and photodiode, 3 - spectrometer, 4 - module triggering the spectroscopy measurement, 5 - computer, 6 - oscilloscope, 7 - timer, 8 - power supply unit (basing on Maiz, 2016)

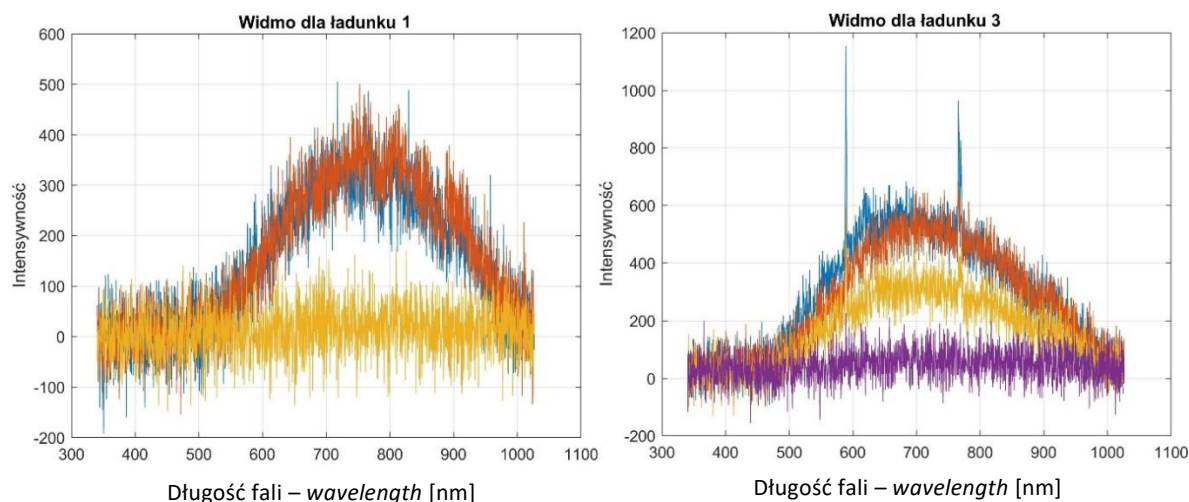


Rys. 5. Zmiana napięcia w czasie dla badanych ładunków 1 i 3

Fig. 5. Change of voltage versus time for investigated charges #1 and 3

Obecność pików na widmie dla ładunku 3. wynika z emisji sodu (589-590 nm) i magnezu (765 i 769 nm). Piki zostały usunięte dla zwiększenia dokładności dopasowania podczas obliczeń. Brak pików w widmie dla ładunku pierwszego wynika z niższej intensywności. Na rys. 7 przedstawiono wyniki pomiaru fotodiody (niebieska linia) i spektrometrem (pomarańczowe trójkąty).

Presence of surges in the spectrum of charge #3 is caused by the emission of sodium (589-590 nm) and magnesium (765 and 769 nm). These peaks were removed to increase the accuracy of fitting at the calculations. The lack of peaks in the spectrum for charge #1 is caused by a lower intensity. The results of measurements by the photodiode (blue line) and by spectrometer (orange triangles) are shown in Fig. 7.



Rys. 6: Widma zarejestrowane dla ładunków 1 i 3

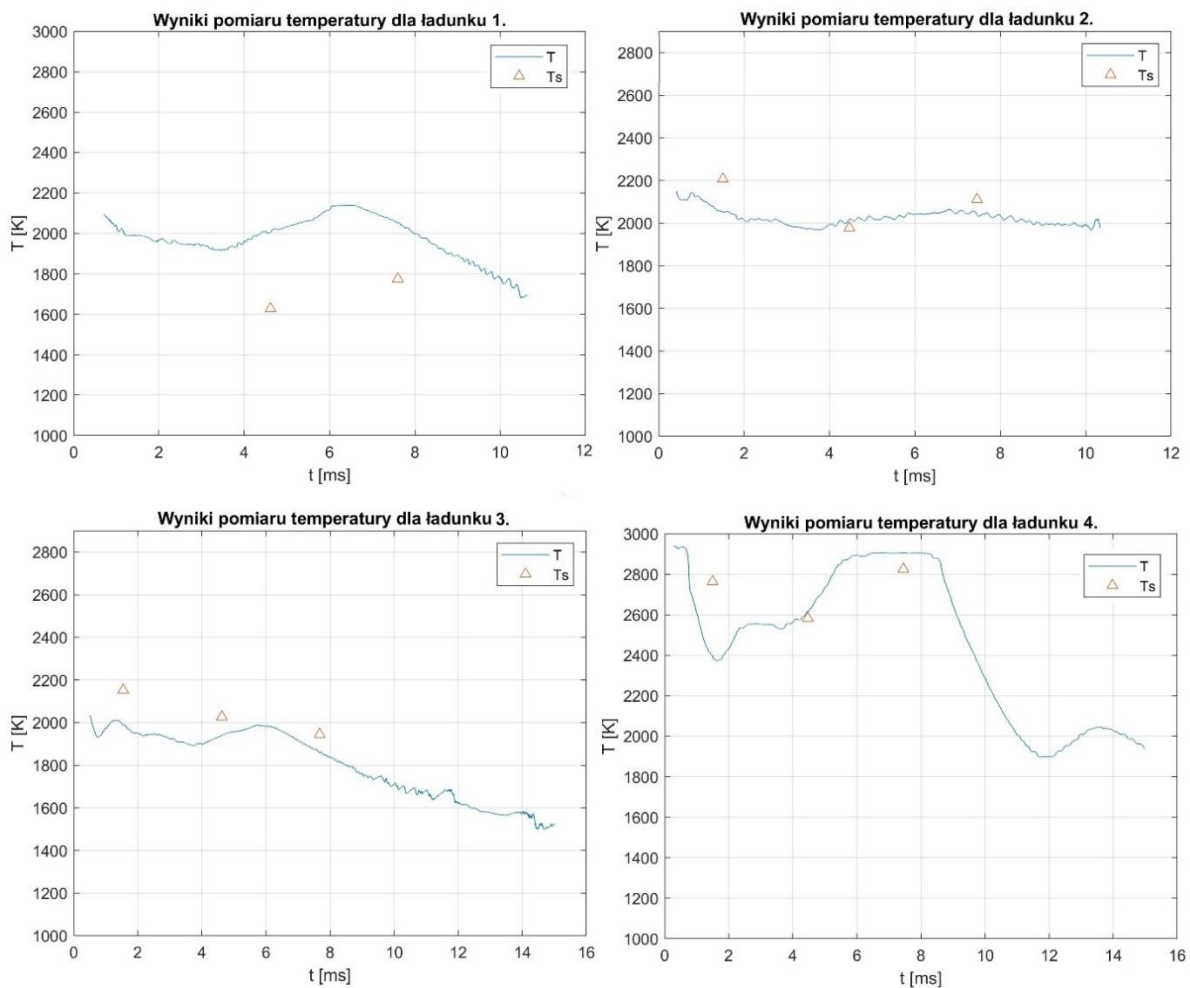
Fig. 6: Spectra recorded for charges # 1 and 3

Wynik pomiarów spektrometrem dla ładunku pierwszego może być zaniżony z powodu niskiej intensywności zebranego widma. Pozostałe pomiary charakteryzują się dobrym odwzorowaniem położenia maksimum temperatury i różnicami wskazań temperatury nie większymi niż 200 K w porównaniu do referencyjnych pomiarów spektrometrem. Warto zauważyć wystąpienie znacznie wyższej temperatury dla ładunku 4.

Na podstawie powyższych wyników należy stwierdzić, że błąd względny pomiarów oscyluje około wartości 10%. Niestety, do przeprowadzenia rachunku błędu niezbędna jest dokładna kalibracja urządzenia za pomocą źródła odpowiadającego modelowi ciała doskonale czarnego, jednak urządzenia zapewniające tak wysokie temperatury mają ograniczoną dostępność. Autorom udało się dotrzeć do źródeł kalibracyjnych o temperaturze jedynie do 1650 K. Dla rachunku błędu konieczne jest również wniknięcie w naturę samego zjawiska dopalania produktów wybuchu i towarzyszących zjawisk optycznych, fizycznych i chemicznych, jednak przekracza to znacznie tematykę tego artykułu.

The result of measurements by spectrometer for the charge #1 may be diminished due to the low intensity of the collected spectrum. The remaining measurements are characterised by a good reconstruction of maximal temperature positions and by temperature measurement differences below 200 K comparing to the spectrometer referential measurements. It is worth to note the presence of much higher temperature for the charge #4.

Basing on the above results it may be stated that the relative error for the measurements is around ca. 10%. Unfortunately, for the evaluation of accuracy a precise calibration of the device with a source equivalent to the model of an absolute black body is needed, but the access to instruments providing such high temperatures is limited. The authors have managed to get access to calibrating sources up to 1650 K. Moreover, for calculation of errors a detailed analysis of the mere effect of explosion products afterburning is needed, together with studies on accompanied effects of optical, physical and chemical character, what is beyond the scope of this paper.



Rys. 7. Wyniki pomiaru dla ładunków 1 – 4
Fig. 7. Measurement results for charges # 1 – 4

5. Wnioski

Opracowana metodyka pomiaru temperatury obłoku produktów wybuchu za pomocą fotodiody dwuzakresowej daje doskonałe narzędzie do rejestracji zmian temperatury obłoku. Jedną z podstawowych zalet tego urządzenia jest jego szybkość działania, ponieważ można w sposób niemal ciągły rejestrować zmiany napięcia na obciążeniach rezystancyjnych fotodiody odpowiadające mocy promieniowania docierającego do niej. Umożliwia to również pomiar czasu dopalania rozrzuconych cząstek.

W porównaniu do spektrometru znacznie większa szybkość rejestracji fotodiody i jej ciągły charakter może posłużyć do zbadania wahań temperatury o krótszym czasie trwania

5. Conclusions

Developed method for explosive products cloud temperature measurement using the dual-range photodiode is a good tool recording the changes of temperature for the cloud. One of the basic advantages of this device is its high speed of operation as it provides almost continuous registration of voltage changes at the diode resistance terminations corresponding to the incident power of radiation. It also can be used to measure the time of afterburning for scattered particles.

A continuous character and much higher speed of registration by the photodiode comparing to the spectrometer may be used to investigate the changes of tem-

(względem czasu rejestracji i zapisu danych ze spektrometru) i niewielkiej intensywności, przykładowo wynikających z przejścia przez obłok produktów wybuchu odbitej fali nadciśnienia. Duża szybkość fotodiody może otwierać możliwości na zastosowanie jej (przy użyciu odpowiedniej aplikacji sprzętowej i oprogramowania) do systemów detekcji wybuchu.

Mieszanina numer 4 wykazała znacznie wyższą temperaturę, co może być związane z wystąpieniem silniejszego efektu termobarycznego w porównaniu do pozostałych mieszanin. Znalezienie największej temperatury dla tego typu mieszanin wymagałoby dalszych badań i modyfikacji układu w celu możliwości rejestracji procesu dopalania o wyższych intensywnościach promieniowania.

Fotodioda wymaga kalibracji za pomocą źródła promieniowania o charakterystyce ciała doskonale czarnego z uwagi na niepewność dostarczonej przez producenta specyfikacji. Kalibracja powinna umożliwić przeprowadzenie rachunku błędu i określenie niepewności pomiarowych.

perature for a shorter time of duration (relating to data recording from the spectrometer) and low intensity, caused for instance by a travelling of a reflected overpressure wave through the cloud of explosion products. The high speed of photodiode may be beneficial at applications for explosion detection systems (at appropriate hardware and software applications).

Composition #4 has shown a much greater temperature what can be caused by occurrence of a much stronger thermobaric effect than for the remaining compositions. Finding out the highest temperature for this type of compositions would require additional investigations and modification of the system to record the afterburning process with higher intensities of radiation.

The photodiode needs to be calibrated by a source of radiation with characteristics of an absolute black body because of uncertainties concerning the specifications provided by manufacturer. The calibration has to enable the calculation of errors and identification of measurement uncertainties.

Literatura / Literature

- Benda-Lutz. (2003). Safety data sheet BLITZ Aluminium/Magnesium, Traismauer.
- Chen, Y., Xu, S., Wu, D. J., Liu, D. B. (2016). Experimental Study of the Explosion of Aluminized Explosives in Air, *Central European Journal of Energetic Materials*, 13, 117-134. DOI: 10.22211/cejem/64967.
- DSD2 - Dual Band Si/InGaAs Detector Spec sheet, Thorlabs, Inc, 2014. (<https://www.thorlabs.com/drawings/2eb51fdf6dbd74af-3579DAAD-5056-0103-79B178B4E1CCD2AA/DSD2-SpecSheet.pdf>. - Dostęp: 20. 01. 2019].
- Feng, Y., Xia, Z., Huang, L., Ma, L. (2018). Effect of Ambient Temperature on the Ignition and Combustion Process of Single Aluminium Particles, *Energy*, 162, 618-629. DOI: 10.1016/j.energy.2018.08.066.
- Gelfand, B.E., Medvedev, S.P., Khomik, S.V., Silnikov, M.V. (2008). Comparative Study of Pressure-temperature Effects from TNT and RDX-IPN-AL, *Military Aspects of Blast and Shock MABS20*.
- Glumac, N., Krier, H., Lynch, P., Peuker, J. (2010). *Optical Spectroscopy of Fireballs from Metallized Reactive Materials*, in: *48th AIAA Aerospace Sciences Meeting. Orlando*,

Florida.

- Gogulya, M., Dolgoborodov, A., Brazhnikov, M., (1999). Investigation of Shock and Detonation Waves by Optical Pyrometry, *International Journal of Impact Engineering*, 23, 283-293. doi.org/10.1016/S0734-743X(99)00080-9.
- Goroshin, S., Frost, D., Levine, J., Yoshinaka, A., Zhang, F. (2006). Optical Pyrometry of Fireballs of Metalized Explosives, *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 3. DOI: 10.1002/prop.200600024.
- Lebel, L., Brousseau, P., Erhardt, L., Andrews, W. (2013). Measurements of the Fireball Temperature Inside an Explosive Fireball, *Journal of Applied Mechanics*, 80(3). DOI: 10.1115/1.4023561.
- Lefrancois, A., Grouffal, J-Y., Bouinot, P. (2002). Temperature and Pressure Measurements Comparison of the Aluminized Emulsion Explosives Detonation Front and Products Expansion, *Twelfth Int. Detonation Symposium*.
- Lewis, W., Rumchik, C., Smith, M. (2013). Emission Spectroscopy of the Interior of Optically Dense Post-Detonation Fireballs, *Journal of Applied Physics*, 113. DOI.org/10.1063/1.4774029.
- Maiz, L., Trzciński, W., Paszula, J. (2016). Optical Spectroscopy to Study Confined and Semi-closed Explosions of Homogeneous and Composite Charges, *Optics and Lasers in Engineering*, 88, 111-119.
- Maiz, L., Trzciński, W., Paszula, J. (2017a). Semi-Closed Investigations of New Aluminized Thermobaric and Enhanced Blast Composites, *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 42, 111-119. doi.org/10.1016/j.optlaseng.2016.08.006.
- Maiz, L., Trzciński, W., Paszula, J. (2017b). Investigation of Fireball Temperatures in Confined Thermobaric Explosions, *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 42. DOI.org/10.1002/prop.201600150.
- Mikron Infrared, Inc. MikroScan 7200V. (<http://www.zycon.com/Literature/225306/71535/7200Vdatasheet.pdf>, dostęp: 20. 01. 2019].
- Mohamed, A., Mostafa, H., Elbasuney, S. (2016). Nanoscopic Fuel-rich Thermobaric Formulations: Chemical Composition Optimization and Sustained Secondary Combustion Shockwave Modulation, *Journal of Hazardous Materials*, 301, 492–503. DOI:10.1016/j.jhazmat.2015.09.019.

