

Materiały Wysokoenergetyczne / High-Energetic Materials, 2015, 7, 53 – 62
ISSN 2083-0165

Badania w zakresie oceny zdolności ochronnych układów zabezpieczających przed rażącym działaniem wybuchu **Research in the field of assessing the ability of safety protection systems glaring effects of explosion**

Piotr Koślik*, Zenon Wilk

Instytut Przemysłu Organicznego w Warszawie, ul Annopol 6, 03-236 Warszawa, PL
Oddział zamiejscowy, ul. Zawadzkiego 1, 42-693 Krupski Młyn, PL

*E-mail: piotr.koslik@ipo.waw.pl

Streszczenie: *W pracy przedstawiono metodykę badawczą związaną z oceną skuteczności oraz optymalizacji układów chroniących przed niszczącym wpływem wybuchu. Skuteczność ochrony zależy od wielu czynników między innymi od struktury i materiału, z jakiego zostały wykonane osłony, grubości poszczególnych warstw oraz ich wzajemnego położenia względem siebie. Wyniki prowadzonych w tym zakresie badań przyczynią się do opracowania konstrukcji osłon poprawiających bezpieczeństwo funkcjonariuszy służb mundurowych i specjalistów stosujących w pracy materiały wybuchowe oraz do ochrony szeroko rozumianej infrastruktury krytycznej.*

Abstract: *The paper presents a methodology of research related to the evaluation of the effectiveness and optimization of protection from the damaging effects of explosion and glaring effects of ammunition. The effectiveness of the protection depends on many factors inter alia the material from which the structure was made sheath, the thickness of the individual layers and their relative position to each other. This research will contribute to improving the safety of the uniformed services and professionals at work using explosives and to protect the broader critical infrastructure.*

Słowa kluczowe: *heksogen, wahadło balistyczne, czujniki ciśnień, fala uderzeniowa*
Keywords: *RDX, ballistic pendulum, pressure sensors, shock wave*

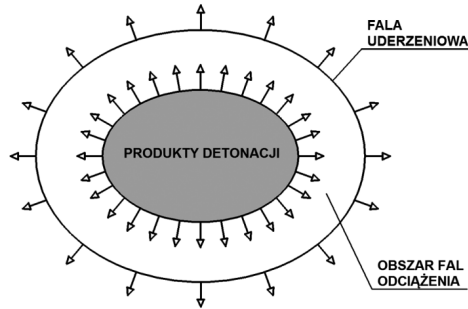
1. Wprowadzenie

Obecny stan wiedzy w dziedzinie ochrony i bezpieczeństwa ludzi, budynków i mienia narażonych na działania terrorystyczne, a w szczególności eksplozje materiałów wybuchowych jest niewystarczający oraz pomijany w polskich przepisach dotyczących infrastruktury publicznej w tym bezpieczeństwa ludzi. Oprócz rozwiniętych norm prawnych w zakresie prewencyjnego działania na wypadek rażących działań związanych z wybuchem brakuje na polskim rynku podstawowych elementów (układów) w postaci osłon (paneli) ochronnych. Zasadniczymi celami takich układów jest zapewnienie bezpieczeństwa osób, ochrona obiektów infrastruktury krytycznej oraz zmniejszenie skutków detonacji MW poprzez ograniczenie oddziaływania wybuchu na otoczenie.

Wydarzenia z ostatnich lat, np. zamach podczas maratonu w Bostonie (USA) w kwietniu roku 2013, wskazują na konieczność rozpatrzenia kwestii zachowania większego bezpieczeństwa w aglomeracjach miejskich, w tym w szczególności podczas imprez masowych. W przypadku Polski działania związane z ochroną antyterrorystyczną przestrzeni wielu miast prowadzone są wybiórczo i nie podążają za przyjętymi w świecie standardami w tej dziedzinie. Zarówno w odniesieniu do ustawy o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym czy ustawy o prawie budowlanym można jednoznacznie stwierdzić, iż brak jest zapisów, które odnosiłyby się do systemów ochrony pasywnej [1, 2].

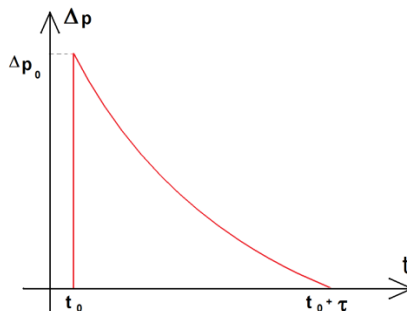
1.1. Czynniki rażące wywołane detonacją ładunku wybuchowego w powietrzu

W wyniku gwałtownej przemiany chemicznej materiału wybuchowego pojawia się obszar nagrzanego ośrodka gazowego nazywanego produktami detonacji. Ciśnienie produktów detonacji materiałów wybuchowych przewyższa ciśnienie atmosferyczne kilkaset tysięcy razy. Działa ono na granicę ośrodka otaczającego produkty detonacji, wytwarzając w nim intensywne fale ciśnienia. Ze względu na gwałtowność procesu wybuchu fale te mają charakter fal uderzeniowych. Fala uderzeniowa przedstawiona jest jako wąska strefa, przemieszczająca się względem ośrodka. Wewnątrz tej strefy przebiegają procesy przekazywania cząsteczkom ośrodka pędu i energii. Szerokość fali uderzeniowej jest rzędu charakterystycznego wymiaru strukturalnej niejednorodności ośrodka. W ośrodku gazowym jest to wielkość rzędu swobodnej drogi ruchu cząstki. W ośrodkach ciekłych i stałych szerokość fali uderzeniowej jest porównywalna ze średnią odległością międzycząsteczkową. Ze względu na małą szerokość fali uderzeniowej można ją traktować jako poruszającą się powierzchnię, przy przejściu, przez którą następuje skokowy wzrost ciśnienia, gęstości i temperatury ośrodka [3]. Przejście fali uderzeniowej powoduje wprawienie w ruch ośrodka otaczającego produkty detonacji. W rezultacie objętość zajęta przez produkty detonacji zaczyna rozszerzać się (rys.1) [3].



Rys. 1. Poglądowy widok rozprężania się produktów detonacji i ruchu fal ciśnienia w ośrodku otaczającym produkty detonacji

Mechaniczne działanie fali uderzeniowej i propagującej za nią fali odciążenia są głównymi czynnikami rażącymi wybuchu. Fala uderzeniowa dociera do rażonego obiektu (człowiek, pojazd, konstrukcja) powodując gwałtowny wzrost ciśnienia działającego na jego powierzchni. Fala odciążenia powoduje stopniowe zmniejszanie się ciśnienia. Zatem na obiekt działa impuls nadciśnienia o charakterze pokazanym na rys. 2 [3].



Rys. 2. Charakter impulsu ciśnienia wywieranego na powierzchnię obiektu poddanego działaniu fali uderzenia [3]

Wartość impulsu wyliczana jest jako całość przebiegu ciśnienia, w swojej dodatniej części początkowej

$$I = \int_t^{t+\tau} \Delta p \, dt \quad (1)$$

2. Metodyka badawcza

2.1. Badanie intensywności powietrznych fal podmuchowych

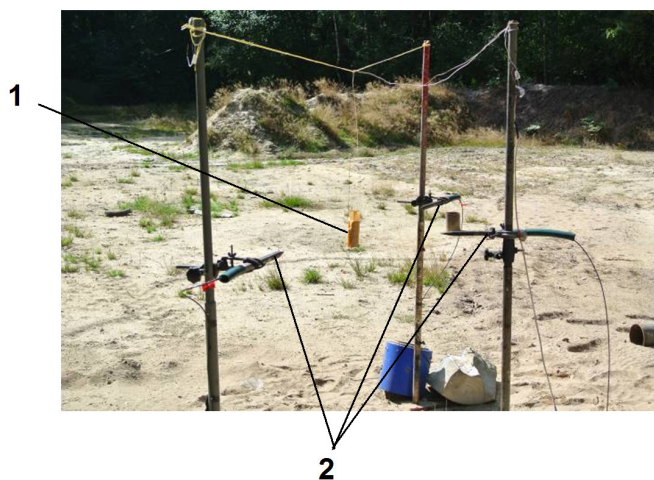
W celu określenia wartości nadciśnienia generowanego z ładunków materiału wybuchowego (MW) wykorzystano stanowisko pomiarowe składające się z cyfrowego oscyloskopu wielokanałowego GWINSTEK GDS-2204 o maksymalnej szybkości próbkowania 1 Gs/s i z trzech czujników ciśnienia. Zastosowano czujniki ciśnienia piezoelektryczne firmy PCB PIEZOTRONICS serii 137. Ich konstrukcja pozwala na rejestrację fali nadciśnienia o bardzo dużych wartościach i w bliskich odległościach od wybuchu. Parametry techniczne użytych czujników podano w tabeli 1.

Tab. 1. Parametry piezoelektrycznych czujników ciśnienia

Parametr	Jednostka	Typ czujnika 137A22 Sn: 7233	Typ czujnika 137A23 Sn: 7282	Typ czujnika 137A23 Sn: 7283
Zakres pomiarowy	kPa	0 - 3448	0 - 345	0 - 345
Rozdzielczość	kPa	0,069	0,069	0,069
Czułość nominalna	mV/kPa	1,242	14,32	13,88
Ciśnienie maksymalne	kPa	6895	6895	6895

Ładunki wybuchowe do badania wykonane zostały metodą prasowania matrycowego z MW na bazie heksogenu (RDX) z dodatkiem cerezyny. Gęstość średnia materiału wynosiła 1,6 g/cm³. Dla ładunków walcowych o średnicy 47 mm przyjęto gramatury: 100 g, 200 g oraz 300 g.

Na rys. 3 przedstawiono widok układu badawczego. Ładunki (1) były podwieszane na wysokości 1 m nad ziemią, w pozycji pionowej i inicjowane do detonacji centralnie od góry. Czujniki do pomiarów ciśnienia fali podmuchowej (2) rozmieszczone zostały w trzech odległościach od środka ładunku: 0,5 m, 0,75 m i 1 m.



Rys. 3. Stanowisko badawcze: 1 – ładunek wybuchowy inicjowany zapalnikiem elektrycznym; 2 – czujniki ciśnienia typu PCB serii 137

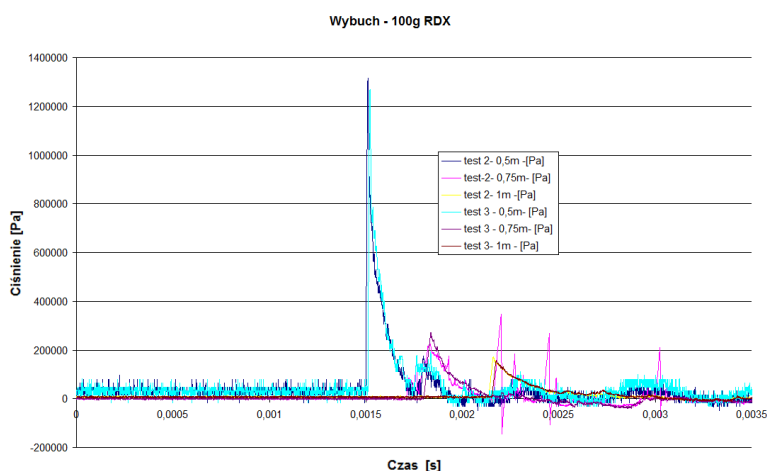
Uzyskane w badaniu przebiegi były archiwizowane przez urządzenie rejestrująco-zapisujące w komputerze przenośnym. Do analiz przebiegów i tworzenia wykresów czasowych ciśnienia użyto oprogramowanie MS Office - EXCEL. Dla przeprowadzonych eksperymentów strzałowych, na podstawie uzyskanych rejestracji, wyznaczono parametry charakteryzujące wybuch ładunków MW w powietrzu takie jak:

- maksymalne ciśnienia na froncie fali uderzeniowej,
- impulsy ciśnienia,
- prędkość propagacji fali uderzeniowej.

2.1.1. Detonacja ładunku 100 g RDX

W układzie badawczym (rys. 3), w centralnym położeniu umieszczono ładunek heksogenowo-cerezynowy (1) o masie 100 g i wymiarach: średnica $d = 47$ mm, wysokość $h = 36$ mm.

Na rys. 4 przedstawiono zestawienie historii ciśnień dla ładunków cylindrycznych o masie 100 g dla dwóch testów.



Rys. 4. Zmiany ciśnienia podczas detonacji ładunku o masie 100 g

Maksymalne ciśnienia otrzymane na froncie fali uderzeniowej w poszczególnych odległościach wyniosło:

0,5 m: $P_{1max} = 1316$ kPa; $P_{2max} = 1268$ kPa;

0,75 m: $P_{1max} = 225$ kPa; $P_{2max} = 271$ kPa;

1,0 m: $P_{1max} = 173$ kPa; $P_{2max} = 159$ kPa.

W całej pracy, analogicznie, parametrem P_{1max} ; P_{2max} ; P_{3max} oznaczono maksymalne wartości zarejestrowanych ciśnień w kolejnych próbach (1, 2, 3, ..., n).

Równocześnie oszacowano prędkość propagacji fali uderzeniowej oraz impulsy ciśnienia. Na odcinku I znajdującym się pomiędzy czujnikami 1 (położony w odległości 0,5 m od ładunku) i czujnikiem 2 (położony w odległości 0,75 m), prędkość wyniosła 791 m/s. Na odcinku II znajdującym się pomiędzy czujnikiem 2 i czujnikiem 3 (położony w odległości 1,0 m od ładunku) średnia prędkość wyniosła 737 m/s. Średnia prędkość propagacji fali uderzeniowej na odcinku 50 cm (pomiędzy czujnikiem 1 a czujnikiem 3) wyniosła 764 m/s.

Impulsy ciśnienia dla kolejnych przebiegów wynosiły następująco:

0,5 m: $I_{p1} = 78,8$ Pa·s; $I_{p2} = 76,7$ Pa·s;

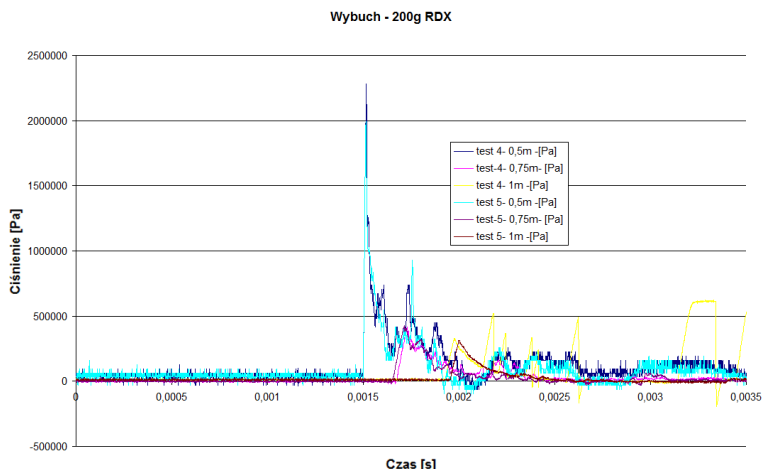
0,75 m: $I_{p1} = 35,1$ Pa·s; $I_{p2} = 32,9$ Pa·s;

1,0 m: $I_{p1} = 31,8$ Pa·s; $I_{p2} = 32,54$ Pa·s.

2.1.2. Detonacja ładunku 200 g RDX

W układzie badawczym (rys. 3), w centralnym położeniu umieszczono ładunek heksogenowo-cerezynowy (1) o masie 200 g i wymiarach: średnica $d = 47$ mm, wysokość $h = 72$ mm.

Na rys. 5 przedstawiono zestawienie historii ciśnień dla ładunków cylindrycznych o masie 200 g RDX, dla dwóch testów.



Rys. 5. Zmiany ciśnienia podczas detonacji ładunku o masie 200 g

Maksymalne ciśnienia otrzymane na froncie fali uderzeniowej w poszczególnych odległościach wyniosły:

0,5 m: $P_{1max} = 2279$ kPa; $P_{2max} = 1990$ kPa;

0,75 m: $P_{1max} = 415$ kPa; $P_{2max} = 426$ kPa;

1,0 m: $P_{1max} = 330$ kPa; $P_{2max} = 313$ kPa.

Równocześnie – podobnie jak w przypadku analiz wybuchu 100 g RDX – oszacowano prędkość propagacji fali uderzeniowej oraz impulsy ciśnienia. Na odcinku I prędkość wyniosła 1157 m/s. Na odcinku II średnia prędkość wyniosła 1016 m/s. Średnia prędkość propagacji fali uderzeniowej na odcinku 50 cm (pomiędzy czujnikiem 1 a czujnikiem 3) wyniosła 1086 m/s.

Impulsy ciśnienia dla kolejnych przebiegów wyniosły następująco:

0,5 m: $I_{p1} = 190,8$ Pa·s; $I_{p2} = 172,4$ Pa·s;

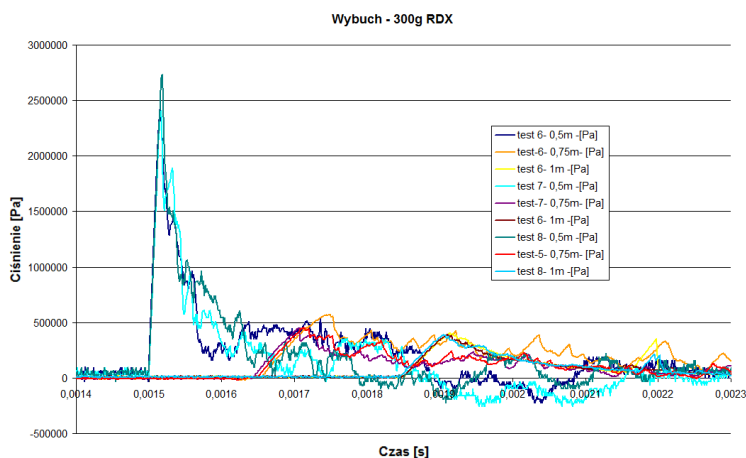
0,75 m: $I_{p1} = 93,4$ Pa·s; $I_{p2} = 77,6$ Pa·s;

1,0 m: $I_{p1} = 53,5$ Pa·s; $I_{p2} = 50,7$ Pa·s.

2.1.3. Detonacja ładunku 300 g RDX

W układzie badawczym (rys. 3), w centralnym położeniu umieszczono ładunek heksogenowo-cerezynowy o masie 300 g i wymiarach: średnica $d = 47$ mm, wysokość $h = 108$ mm.

Na rys. 6 przedstawiono zestawienie historii ciśnień dla ładunków cylindrycznych o masie 300g RDX, dla trzech testów.



Rys. 6. Zmiany ciśnienia podczas detonacji ładunku o masie 300 g

Maksymalne ciśnienia otrzymane na froncie fali uderzeniowej w poszczególnych odległościach wyniosły:

0,5 m: $P_{1max} = 2440$ kPa; $P_{2max} = 2408$ kPa; $P_{3max} = 2729$ kPa;

0,75 m: $P_{1max} = 571$ kPa; $P_{2max} = 450$ kPa; $P_{3max} = 455$ kPa;

1,0 m: $P_{1max} = 408$ kPa; $P_{2max} = 397$ kPa; $P_{3max} = 391$ kPa.

Podobnie, jak w przypadku poprzednich analiz, oszacowano prędkość propagacji fali uderzeniowej oraz impulsy ciśnienia po detonacji ładunku 300 g. Na odcinku I prędkość wyniosła 1323 m/s. Na odcinku II średnia prędkość wyniosła 1225 m/s. Średnia prędkość propagacji fali uderzeniowej na odcinku 50 cm (pomiędzy czujnikiem 1 a czujnikiem 3) wyniosła 1274 m/s.

Impulsy ciśnienia dla kolejnych przebiegów wynosiły następująco:

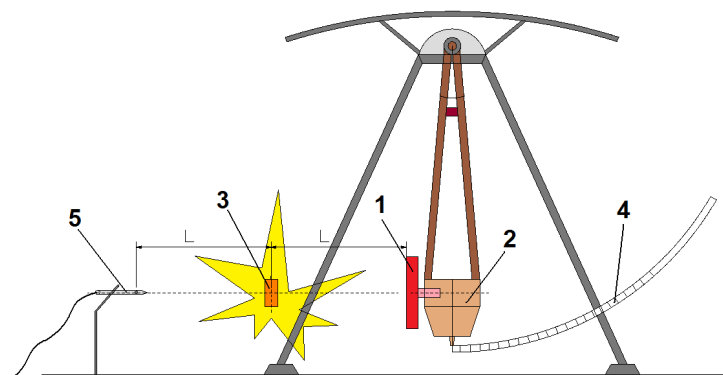
0,5 m: $Ip1 = 190,8$ Pa·s; $Ip2 = 157,5$ Pa·s; $Ip3 = 154,9$ Pa·s;

0,75 m: $Ip1 = 216,5$ Pa·s; $Ip2 = 127,8$ Pa·s; $Ip3 = 105,2$ Pa·s;

1,0 m: $Ip1 = 60,3$ Pa·s; $Ip2 = 62,9$ Pa·s; $Ip3 = 66$ Pa·s.

2.2. Badanie zdolności układów ochronnych do absorpcji energii fali uderzeniowej metodą wahadła balistycznego

Badania z wykorzystaniem wahadła balistycznego przeprowadzone zostały na poligonie w Oddziale IPO w Krupskim Młynie. W metodzie tej, odmiennie do standardowej procedury oraz normy (PN-C-86035:1999) wykorzystano znajdujące się gniazdo w moździerz do montażu układów (lub paneli) ochronnych. Układy te wykonano zarówno w postaci paneli sztywnych oraz podatnych z absorberem. W odległości 25 cm lub 50 cm od powierzchni paneli umieszczano, a następnie detonowano ładunki MW. W celu weryfikacji wielkości impulsu ciśnienia wywołanego detonacją MW i odniesienia się do uzyskanych wartości pracy wykonanej przez wahadło prowadzono równocześnie pomiary ciśnienia za pomocą czujników piezoelektrycznych. Widok układu badawczego przedstawiono na rys. 7.



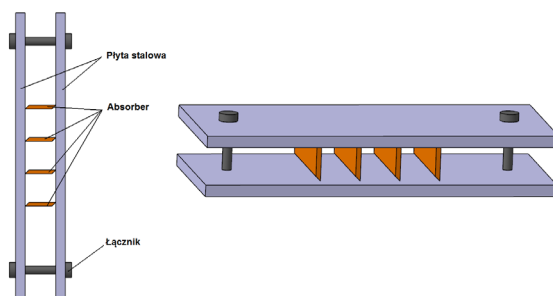
Rys. 7. Układ badawczy do pomiaru pracy fali uderzeniowej z wykorzystaniem wahadła balistycznego:
1 – panel ochronny; 2 – moździerz; 3 – ładunek wybuchowy; 4 – liniał pomiarowy kąta odchylenia;
5 – czujnik ciśnienia

W pierwszej fazie badawczej wykonano testy z wykorzystaniem paneli nieodkształcalnych. Zadaniem tego układu było wyznaczenie pracy wykonanej przez odchylające się wahadło w wyniku parcia na układ nieodkształcalny, zamontowany na moździerz, fali uderzeniowej (rys. 8). Praca ta jest równoważna energii fali uderzeniowej wygenerowanej przez zdetonowany ładunek wybuchowy o masie m MW odniesiona do powierzchni układu ochronnego. Wyznaczona wartość energii dla układu nieodkształcalnego stanowi odniesienie dla badań układów podatnych.



Rys. 8. Widok układu badawczego

Po serii testów z nieodkształcalnym układem ochronnym przeprowadzono badania układów podatnych. Na rys. 9 przedstawiono widok przykładowego układu podatnego zawierający w swojej konstrukcji elementy absorbujące energię. Układ absorbuje energię w wyniku odkształcania elementów podatnych.



Rys. 9. Panel ochronny z absorberem I

Wyniki oszacowanych zdolności badanych układów ochronnych do absorpcji energii fali uderzeniowej zestawiono w tabeli 2. Ponadto umieszczono w niej pomierzone za pomocą czujników piezoelektrycznych wartości ciśnienia i impulsu ciśnienia fali uderzeniowej oddziaływującej na układ.

Tab. 2. Wyniki badań zdolności do absorpcji energii udarowej badanych układów ochronnych

Układ	Masa MW [g]	Odległość, L [cm]	Wychylenie wahadła [°]	Energia wahadła, E [J]	Ciśnienie, P_{max} [kPa]	Impuls ciśnienia, I_p [Pa·s]
sztywny	100	25	1°35'	105,7	-	-
	200	50	2°15'	150,2	1830	150
	200	50	2°30'	167	1990	172,4
	300	50	2°50'	189,1	2440	190,8
podatny: I	100	50	1°25'	94,6	-	-
	200	50	1°45'	116,8	1860	162
podatny: II	200	50	2°05'	139	2279	190,8
	300	50	2°20'	155,8	2550	195,4

Energię wahadła balistycznego wyznaczono ze wzoru

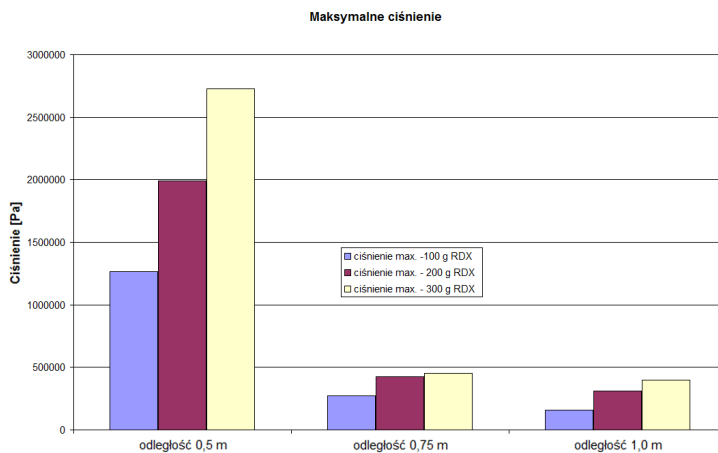
$$W = E = M \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (2)$$

gdzie: M – masa moździerz wraz z panelem: $M = 390$ kg; g – przyspieszenie ziemskie: $g = 9,81$ m/s²; α – kąt wychylenia wahadła. Każdorazowo, w przypadku montażu paneli podatnych i sztywnych dobierano masę układu (dodając lub ujmując dodatkowe stalowe płytki) tak, by suma układu (moździerz wraz z panelem) była stała.

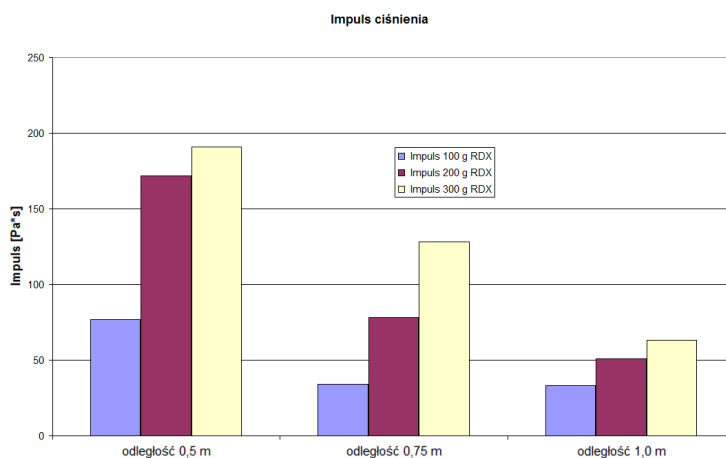
2. Podsumowanie i wnioski

Przedstawiona metodyka pozwala szacować zdolność układów energochłonnych do absorpcji energii wybuchu a tym samym ocenę ich skuteczności ochronnej.

W trakcie eksperymentów wyznaczono charakterystyki generowanej fali uderzeniowej dla różnych mas materiału wybuchowego (100 g, 200 g, 300 g). Pomiary rejestrowano w trzech punktach, w odległościach 0,5 m, 0,75 m, 1,0 m wyznaczonych od środka ładunku. Na tej podstawie oszacowano maksymalne wartości ciśnienia (P_{max}) (rys.10) oraz impulsy ciśnienia (I_p) (rys. 11).

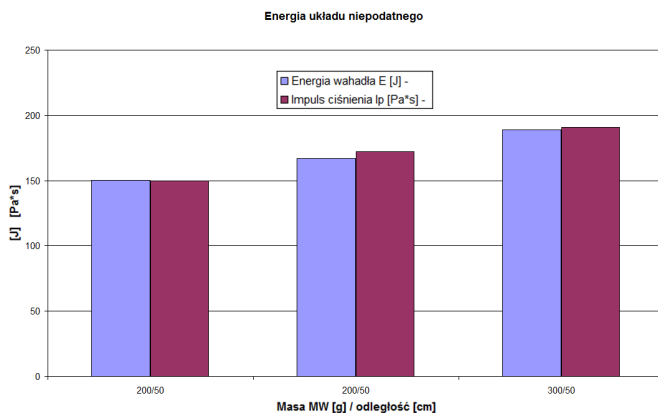


Rys. 10. Maksymalne ciśnienia rejestrowane w trzech odległościach pomiarowych



Rys. 11. Impulsy ciśnienia oszacowane w trzech odległościach pomiarowych

W trakcie prowadzenia eksperymentów zaobserwowano pewną zależność wynikającą z charakterystyki fali uderzeniowej w powietrzu wyznaczonej za pomocą czujników ciśnienia w odniesieniu do pracy jaką wykonało wahadło balistyczne. Dla reprezentatywnego przykładu impuls ciśnienia oszacowany z pomiaru czujnikiem piezoelektrycznym wyniósł: $I_p = 150 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, natomiast energię wahadła wyznaczoną w tym teście oszacowano: $E = 150,2 \text{ J}$ (rys. 12).



Rys. 12. Impuls ciśnienia i energia wahadła – układ niepodatny

Układy ochronne oznaczone jako „podatny I” mają zdolność tłumienia fali uderzeniowej na poziomie 5% w przypadku wybuchu 100 g MW w odległości 25 cm. Ten sam panel absorbuje energię szacowaną na poziomie 28% dla ładunków 200 g zdetonowanych w odległości 50 cm. Na tej podstawie wnioskuje się że układ ten jest zbyt sztywny (nieodstatecznie podatny) w stosunku do energii fali uderzeniowej.

Panele z układem podatnym II posiadają zdolność ochronną oszacowaną na poziomie 27% w przypadku detonacji ładunku o masie 200 g w odległości 50 cm oraz 20% w przypadku detonacji ładunku o masie 300 g w odległości 50 cm.

Literatura

- [1] *Global Terrorism Database (GTD)*. National Consortium for the Study of Terrorism and Responses to Terrorism. University of Maryland, <http://www.start.umd.edu>
- [2] Łodygowski Tomasz, Sielicki W. Piotr, Sumelka Wojciech, Peksa Piotr, Olejnik Marcin, Puk Karo. 2014. „Wybrane aspekty bezpieczeństwa ludzi, budynków i mienia poprzez systemy ochrony pasywnej”. *Logistyka* 5 : 926-939.
- [3] Cudziło Stanisław, Maranda Andrzej, Nowaczewski Jerzy, Trębiński Radosław, Trzcziński A. Waldemar. 2000. *Wojskowe materiały wybuchowe*. Wyd. Polit. Częstochowskiej, ISBN 8387745502.
- [4] Łodygowski Tomasz, Garstecki Andrzej. 2012. *Bezpieczeństwo budowlı w warunkach zagrożenia terrorystycznego*. Poznań : Wyd. Politechniki Poznańskiej, ISBN 9788377752081.