



BIULETYN WAT  
VOL. LV, NR 2, 2006

## Metody generowania impulsu ciśnienia w powietrzu do oceny odporności wybuchowej elementów konstrukcji

BOGDAN ZYGMUNT, JÓZEF PASZULA, RYSZARD REKUCKI<sup>1</sup>

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechatroniki,

<sup>1</sup>Wydział Inżynierii, Chemii i Fizyki Technicznej,  
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

**Streszczenie.** Wymagania stawiane niektórym przemysłowym i publicznym obiektom budowlanym zostały poszerzone o kryterium odporności na impuls ciśnienia wytworzony przez przypadkowy wybuch lub zamierzony atak terrorystyczny. Elementami szczególnie wrażliwymi, a jednocześnie odpowiedzialnymi za bezpieczeństwo ludzi i wyposażenia w obiekcie budowlanym, są okna, drzwi, żaluzje oraz urządzenia wentylacyjne. Badania odporności wybuchowej wymienionych elementów konstrukcji obiektów oraz nadawanie im klas bezpieczeństwa określają normy europejskie ustanowione w ostatnich latach. Podstawowym narzędziem do przeprowadzenia badań odporności wybuchowej jest generator impulsu ciśnienia o czasie trwania min. 20 milisekund oraz amplitudzie rzędu ułamka megapascala. Autorzy zaproponowali zastosowanie generatorów składających się z kombinowanego ładunku detonującego oraz wybuchowego (typu pirotechnicznego), które wytwarzają silny impuls ciśnienia w powietrzu. Parametry impulsu można regulować w szerokich granicach, zmieniając masę ładunków oraz sposób ich inicjowania. W artykule opisano zastosowanie opracowanego generatora impulsu ciśnienia w powietrzu do oceny odporności wybuchowej drzwi i okien przemysłowych.

**Słowa kluczowe:** impuls ciśnienia, ładunek wybuchowy, obciążenie falą ciśnienia

**Symbole UKD:** 662.1

### 1. Wstęp

Wymagania stawiane materiałom i elementom konstrukcyjnym stosowanym we współczesnym budownictwie przemysłowym, publicznym i mieszkalnym wzrastają wraz z nowymi wyzwaniami podnoszącymi kryteria ochrony ludzi prze-

bywających w wymienionych obiektach. W ostatnich latach szczególną uwagę zwrócono na konstrukcję drzwi, okien i żaluzji charakteryzujących się zdolnością ochrony ludzi i wyposażenia narażonych na przypadkowy lub rozmyślny wybuch. Podstawowe zastosowanie opracowanych w tym celu norm międzynarodowych dotyczy głównie obiektów przemysłowych zagrożonych wybuchem oraz innych budynków użyteczności publicznej (urzędy, biurowce, placówki kulturalne itp.) narażonych na atak terrorystyczny [1]. Odpowiednio zaprojektowana konstrukcja okien, drzwi i ścian oraz prawidłowo dobrany materiał na oszklenie umożliwiają zmniejszenie zagrożenia dla ludzi, zwłaszcza w zakresie dolnej granicy ciśnienia, wywołującego szkodliwe skutki dla organizmu człowieka.

Obowiązujące normy dotyczące badania odporności okien i drzwi na wybuch zalecają, aby badany element poddany był oddziaływaniu fali ciśnienia o wymaganej amplitudzie i rozkładzie czasowym dodatniej jego fazy, wytworzonej przez wzorcowy ładunek TNT o znanej masie w odpowiedniej odległości. Wymagania norm międzynarodowych warunkują amplitudę ciśnienia fali odbitej od badanego obiektu w zakresie 50 do 250 kPa (0,5 do 2,5 bar) oraz czas trwania impulsu powyżej 20 ms. Aby spełnić taki warunek należałoby zastosować ładunki TNT o masie co najmniej kilkuset kg, detonowane w odległości powyżej 20 m od badanego obiektu.

Z uwagi na problemy techniczne i ochronę środowiska, generowanie impulsów ciśnienia ładunkami MW o dużej masie jest kosztowne. Ze względu na zapewnienie odpowiedniej strefy bezpieczeństwa wymagane jest także korzystanie ze specjalistycznych poligonów posiadających rozległe tereny.

Alternatywą powyższej metody generowania impulsów ciśnienia są urządzenia zwane rurami uderzeniowymi. Są to zwykle metalowe rury lub żelbetowe tunele odpowiedniej długości, w których na jednym końcu znajduje się generator ciśnienia (sprężony gaz lub układ wybuchowy), a na drugim końcu umieszcza się obiekt poddawany oddziaływaniu impulsu ciśnienia. Ściany rury uderzeniowej formują powstającą w niej falę ciśnienia oraz ograniczają straty energetyczne. Umożliwia to minimalizację masy stosowanego układu wybuchowego. Jako układy wybuchowe stosować można różnego rodzaju MW oraz ich mieszaniny. Dzięki temu możliwe jest uzyskiwanie impulsów ciśnienia o zróżnicowanej amplitudzie ciśnienia, czasie trwania oraz rozkładzie ciśnienia w funkcji czasu.

W niniejszej pracy przedstawiono praktyczne możliwości techniczne generowania impulsu ciśnienia w warunkach laboratoryjnych i poligonowych do oceny odporności wybuchowej drzwi, okien, szyb i żaluzji. Spełniają one wymagania odpowiednich norm europejskich i krajowych [2, 3]. Na uwagę zasługuje zaproponowana przez autorów metoda generowania fali ciśnienia o wysokim regulowanym impulsie z zastosowaniem bardzo szybko spalających się stałych mieszanin pirotechnicznych, która może znaleźć zastosowanie również w innych aplikacjach.

## 2. Impuls ciśnienia generowany detonacją ładunku skondensowanego MW

Detonujący ładunek MW wytwarza w otoczeniu falę uderzeniową propagującą się z prędkością naddźwiękową, malejącą szybko z odległością. Charakterystyczną cechą fali uderzeniowej jest wysoki gradient narastania wartości ciśnienia na czole fali. W celu określenia masy ładunku TNT do wytworzenia na określonej odległości impulsu ciśnienia o pożądanych parametrach, posłużono się wzorami (1-3) [4]:

$$\Delta p_{TNT} = \begin{cases} \left[ \frac{1,37996}{\bar{R}} + \frac{0,54326}{\bar{R}^2} - \frac{0,035029}{\bar{R}^3} + \frac{0,0006129}{\bar{R}^4} \right] \text{ [MPa]} & 0,05 \leq \bar{R} \leq 0,3 \\ \left[ \frac{0,60740}{\bar{R}} - \frac{0,031989}{\bar{R}^2} + \frac{0,20912}{\bar{R}^3} \right] \text{ [MPa]} & 0,3 \leq \bar{R} \leq 1 \\ \left[ \frac{0,06492}{\bar{R}} + \frac{0,39717}{\bar{R}^2} + \frac{0,32244}{\bar{R}^3} \right] \text{ [MPa]} & 1 \leq \bar{R} \leq 10 \end{cases} \quad (1)$$

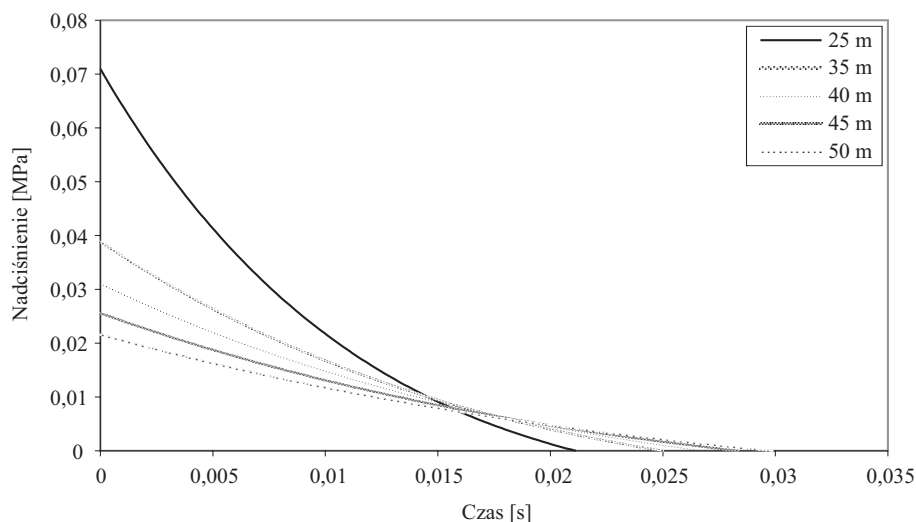
$$\frac{\tau}{\sqrt[3]{m_{TNT}}} = 10^{-3} \left( 0,107 + 0,444\bar{R} + 0,264\bar{R}^2 - 0,129\bar{R}^3 + 0,0335\bar{R}^4 \right) \left[ \frac{s}{kg^{1/3}} \right] \quad (2)$$

$$\Delta p(t) = \Delta p_{TNT} \left( 1 - \frac{t}{\tau} \right) e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (3)$$

gdzie:  $m_{TNT}$  — masa ładunku trotylu w [kg];  $\bar{R}$  — odległość zredukowana  $\bar{R} = \frac{R}{\sqrt[3]{m_{TNT}}}$ ;  $R$  — odległość od ładunku w [m].

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że spełnienie wymagań normy w zakresie wygenerowania fali ciśnienia o odpowiednich parametrach możliwe jest przy detonacji ładunku o masie około 500 kg. Prognozowany impuls ciśnienia dla różnych odległości od centrum wybuchu dla takiego ładunku przedstawiono na wykresie (rys. 1).

Uwzględniając sformułowane wyżej ograniczenia dotyczące stosowania ładunków skondensowanych MW w generowaniu impulsu ciśnienia o czasie trwania dodatniej fazy min. 20 ms, przeprowadzono eksperymenty z wydłużonymi ładunkami materiału o małej prędkości detonacji. Jako MW zastosowano saletrol (saletra porowata — 94%, olej mineralny — 6%) w postaci ładunku o masie 10 kg w osłonie polietylenowej o średnicy 100 mm i długości 170 cm. Prędkość detonacji saletrolu wynosiła ok. 2,2 km/s [5]. Ładunek umieszczono na otwartej



Rys. 1. Przebiegi nadciśnienia w czasie wywołanego ładunkiem TNT o masie 500 kg na różnych odległościach od wybuchu

przestrzeni, równoległe do piaszczystego podłoża na wysokości 130 cm w odległości 7,5 m od początku ładunku do punktu pomiaru ciśnienia. Ładunki pobudzano detonatorem trotylowym o masie 150 g, umieszczonym na początku ładunku (bliżej czujnika ciśnienia) lub na jego końcu. Na zdjęciu (rys. 2) przedstawiono układ przed zdetonowaniem.

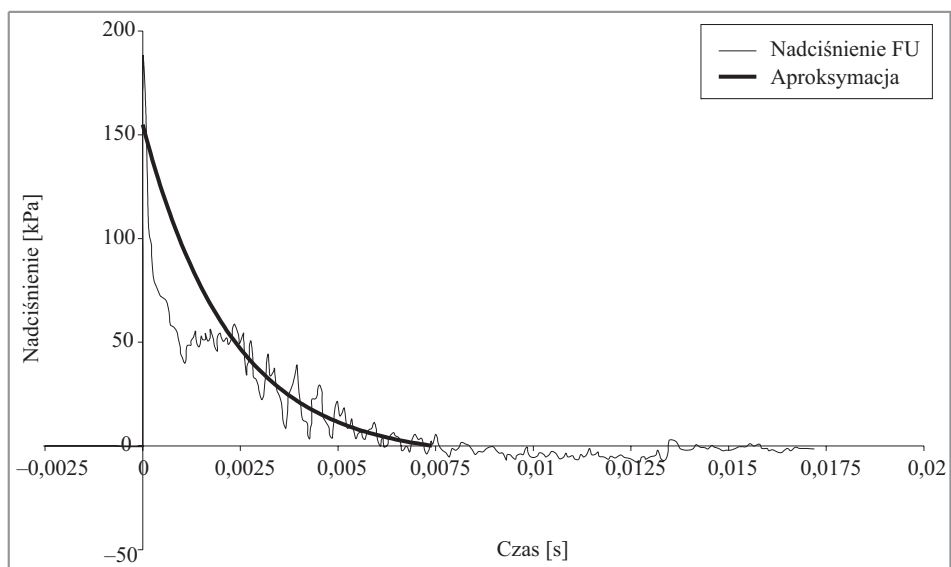
Nieco dłuższy impuls uzyskano przy umieszczeniu detonatora na początku ładunku wybuchowego. Wykres impulsu ciśnienia dla tego przypadku przedstawiono na rysunku 3.

Zastosowanie wydłużonego ładunku wybuchowego o małej prędkości detonacji nie spowodowało wyraźnego wydłużenia czasu trwania impulsu. Czas trwania impulsu wyliczony ze wzoru (1-3) dla ładunku TNT o tej samej masie (10 kg) jest tylko o ok. 1,5 ms krótszy w porównaniu z czasem zmierzonym dla ładunku wydłużonego. Jest jednak zbyt krótki, aby można uznać go za wystarczający do spełnienia warunków normatywnych. Należy zaznaczyć, że wartości ciepła wybuchu trotylu i saletrolu są zbliżone i wynoszą ok. 4100 kJ/kg.

Bardzo efektywnym i łatwym w realizacji sposobem generowania silnych impulsów ciśnienia na otwartej przestrzeni okazało się zastosowanie mieszanin pirotechnicznych spalających się z wysoką prędkością. Dokładniejszy opis metody przedstawiono w punkcie 3. Na wykresie (rys. 4) przedstawiono wyniki pomiarów ciśnienia w czasie dla kombinowanych ładunków składających się z 3 kg saletrolu oraz 1 lub 4 kg mieszaniny pirotechnicznej MFB. Ładunek saletrolu służył w tych próbach jako inicjator ładunku pirotechnicznego, który ulegał

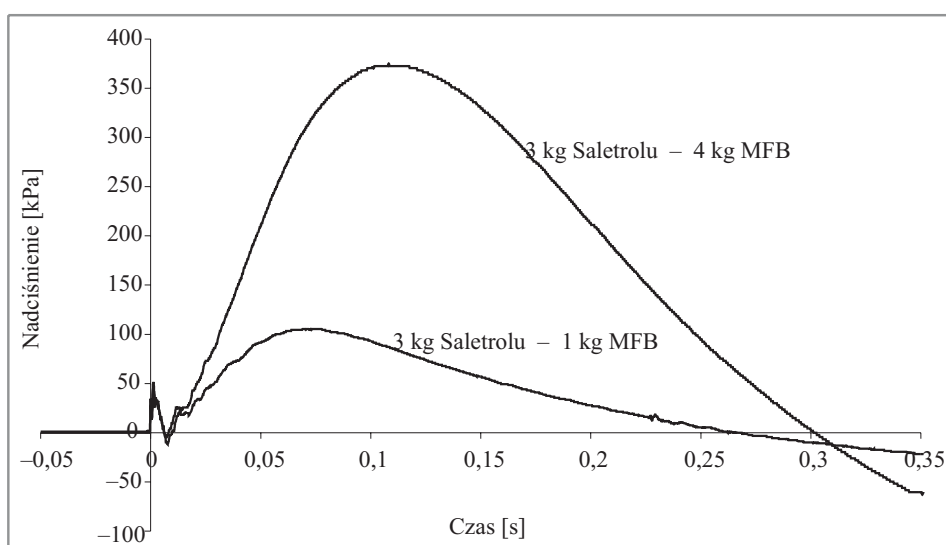


Rys. 2. Wydłużony ładunek saletrolu o masie 10 kg do generowania impulsu ciśnienia



Rys. 3. Impuls ciśnienia w powietrzu generowany detonacją ładunku saletrolu o masie 10 kg. Linia pogrubioną oznaczono aproksymację dodatniej fazy obciążenia

zapaleniu i rozproszeniu w powietrzu oraz wtórnemu zapłonowi w czasie wielokrotnie dłuższym niż czas detonowania ładunku saletrolu. Na wykresie (rys. 4) w początkowej fazie przebiegu można zauważyć trwający kilka milisekund niewielki impuls fali uderzeniowej, pochodzący od pobudzacza TNT i 3 kg saletrolu. Pojawiający się po nim impuls fali ciśnienia, wytworzony wybuchem ładunku pirotechnicznego, jest o dwa rzędy wielkości większy w porównaniu z wartością impulsu ciśnienia wywołanego detonacją ładunku kruszącego.



Rys. 4. Przebiegi impulsów ciśnienia generowanych kombinowanymi ładunkami skondensowanymi MW: 1 — 3 kg ANFO + 1 kg MFB; 2 — 3 kg ANFO + 4 kg MFB

### 3. Impuls ciśnienia generowany wybuchem mieszaniny gazowej

Detonacja mieszanin gazowych, np. łatwo lotnego węglowodoru lub palnego gazu z powietrzem, w porównaniu z parametrami detonacji skondensowanych MW, charakteryzuje się występowaniem znacznie niższego ciśnienia w centrum wybuchu oraz wydłużeniem impulsu ciśnienia w czasie. Ciśnienie detonacji skondensowanych MW jest rzędu 10 000 MPa, podczas gdy ciśnienie detonacji mieszanin gazowych wynosi zaledwie kilka megapaskali. Charakter rozprężania gazów powybuchowych dla mieszanin gazowych powoduje, że impuls ciśnienia jest znacznie dłuższy. Wymagane jest to przy badaniach odporności obiektów, wyrobów i materiałów na obciążenie wybuchowe.

Stosując do generacji impulsu ciśnienia mieszaniny gazowe (paliwowo-powietrzne), wykorzystano metalową komorę z wymiennymi kołnierzami o kształcie

dopasowanym do wymiarów powierzchni elementu poddawanego obciążeniu (szyby, okna lub drzwi), zamocowanego do sztywnej ramy stanowiska badawczego. Przed momentem wybuchu komorę dosuwano do pionowej płaszczyzny modelującej obiekt obciążany. Była to komora o wymiarach  $1100 \times 900 \times 1800$  mm. Jej pojemność wynosiła ok.  $1,5 \text{ m}^3$ . W momencie przeprowadzania próby krawędzie otwartej części komory wybuchowej przylegały szczelnie do powierzchni badanego elementu konstrukcji. Miejsce kontaktu obu elementów uszczelniono gumową kształtką. Konstrukcję komory wybuchowej przedstawiono na zdjęciu (rys. 5).



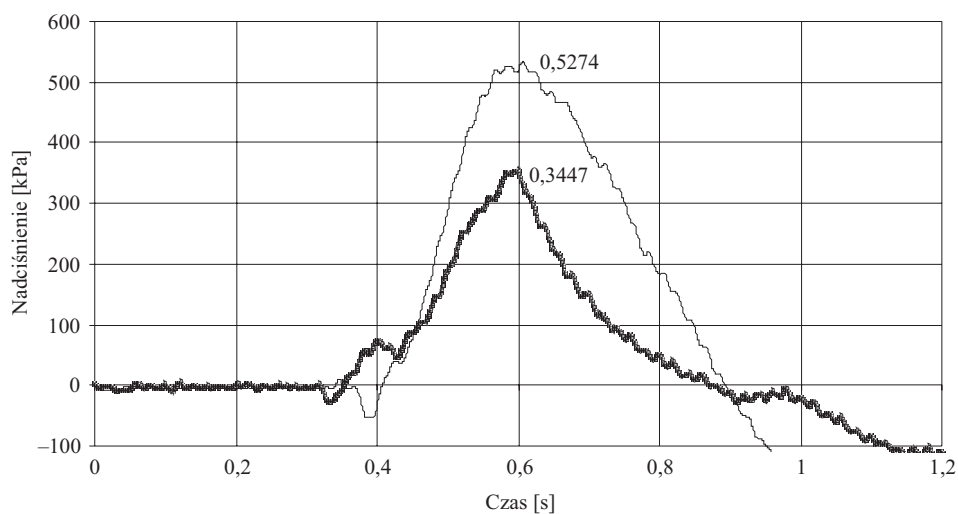
Rys. 5. Komora wybuchowa do wytwarzania impulsu ciśnienia z użyciem MPP

Jako mieszaninę gazową do wytworzenia wydłużonego w czasie impulsu ciśnienia wybrano mieszaninę par heksanu z powietrzem. Mieszaninę wytwarzano w całej objętości komory, stosując różny skład chemiczny przez odparowanie określonych ilości ciekłego heksanu wewnątrz uszczelnionej komory wybuchowej. Przeprowadzono próby z mieszaniną o składzie zbliżonym do stechiometrycznego (ok. 8% zawartości heksanu w powietrzu) oraz z mieszaniną zubożoną w heksan (ok. 6,5%). Wytworzoną mieszaninę wybuchową inicjowano ładunkiem detonującym o masie ok. 1,5 g. Ciśnienie mierzono czujnikami piezokwarcowymi umieszczonymi w środkowej części badanego elementu konstrukcyjnego. Przebiegi ciśnienia przedstawiono na wykresie (rys. 6).

Uzyskane przebiegi ciśnienia wskazują, że przemiana wybuchowa badanej mieszaniny nie jest detonacją, na co wskazuje brak frontu uderzeniowego w zarejestrowanej fali ciśnienia oraz poziom ciśnienia maksymalnego (ułamek megapascala). Wybuch badanej mieszaniny generuje jednakże falę ciśnienia o takich



parametrach, że można wykorzystać ten efekt do badania odporności wybuchowej wyrobów w warunkach laboratoryjnych bez korzystania z rozległych powierzchni poligonów. Opisana metoda generowania impulsu ciśnienia odpowiada w szczególności warunkom badania odporności szyb i konstrukcji okiennych na obciążenia pożarowo-wybuchowe, charakteryzujące się parametrami o wartościach porównywalnych z uzyskanymi w powyższych doświadczeniach.



Rys. 6. Impuls ciśnienia mieszanki gazowej o różnym składzie chemicznym

#### 4. Impuls ciśnienia generowany wybuchem stałej mieszanki pirotechnicznej

Zastosowanie wybuchowej mieszanki gazowej do generowania impulsu ciśnienia umożliwiło uzyskanie wymaganych parametrów impulsu (amplituda, czas trwania i wartość impulsu). Stwierdzono jednak niezadawalającą powtarzalność w kolejnych próbach, spowodowaną nieszczelnościami komory wybuchowej oraz dużym wpływem rodzaju stosowanego inicjowania na przebieg wybuchu. Wykorzystując doświadczenia w pracach z mieszaninami pirotechnicznymi, autorzy zastosowali nowy rodzaj mieszanki fotobłyskowej (MFB), charakteryzującej się wysoką, subsoniczną prędkością palenia. Efektem spalania takiej mieszanki na otwartej przestrzeni jest silny huk, nawet przy niewielkich kilkugramowych naważkach. Operowanie substancją stałą zamiast lotną mieszaniną gazową do wytworzenia impulsu ciśnienia okazało się wygodnym sposobem generowania fali ciśnienia w badaniach odporności wybuchowej okien i drzwi.

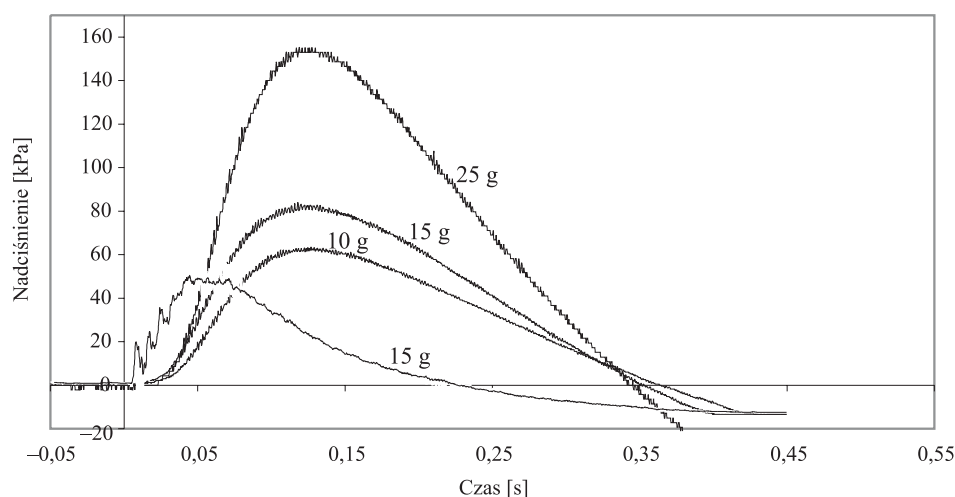
Z uwagi na element nowości w wykorzystaniu MFB do generowania impulsu ciśnienia, należało zbadać wpływ rodzaju pobudacza oraz intensywności po-



budzenia na charakter wytworzonego impulsu. Zastosowana MFB jest bardzo wrażliwa na bodźce termiczne, głównie płomień oraz gorące iskry, przy umiarkowanej wrażliwości na bodźce mechaniczne. Wybrano więc pobudzenie zapłonikiem elektrycznym wytwarzającym ukierunkowany impuls ogniowy oraz niezbadane dotychczas pobudzenie detonacją ładunku materiału wybuchowego.

Pomiary parametrów impulsu ciśnienia przeprowadzono w komorze wybuchowej opisanej w punkcie 3. W pierwszej kolejności wykonano kilka wstępnych prób generowania impulsu ciśnienia, w celu ustalenia masy ładunku i jego przestrzennego rozmieszczenia wewnątrz komory. Przeprowadzono próby z naważkami MFB o masie 10, 15 oraz 25 g. Ładunki umieszczano na przeciwległej ścianie komory w odległości 1,2 m od punktu pomiaru ciśnienia. Wyniki pomiarów ciśnienia uzyskane przy inicjowaniu ładunków zapłonikiem elektrycznym, zarejestrowane na oscyloskopie, przedstawiono na rysunku 8. Dla ustalonych warunków przeprowadzania pomiaru zaobserwowano regularną powtarzalność uzyskanych przebiegów. Amplituda ciśnienia jest proporcjonalna do masy ładunku, podczas gdy czas trwania dodatniej fazy impulsu jest stały, niezależnie od masy użytego ładunku. Czas trwania dodatniej fazy impulsu wynosi ok. 300 ms. Czas narastania ciśnienia do wartości maksymalnej jest względnie długi i dochodzi do 100 ms, również niezależnie od masy ładunku.

W drugiej serii prób, mających na celu dobranie ładunku generującego impuls ciśnienia zgodny z wymaganiami normatywnymi, dla zainicjowania ładunku MFB zastosowano spłonkę pobudzającą zawierającą ok. 1,0 g ładunku silnego materiału wybuchowego (zapalnik górniczy skalny). Na rysunku 7 przedsta-



Rys. 7. Impuls ciśnienia mieszaniny fotobłyskowej o różnej masie ładunku (10, 15 i 25 g) inicjowanej płomieniem oraz ładunku o masie 15 g pobudzonego spłonką detonującą (zap)

wiono również przebieg nadciśnienia w czasie dla ładunku MFB o masie 15 g, zainicjowanej silnym impulsem detonacyjnym. Obraz wytworzonego impulsu dla tej samej naważki MFB jest zmieniony. Czas trwania impulsu uległ skróceniu do ok. 200 ms, podczas gdy czas narastania ciśnienia do wartości maksymalnej spadł do 40 ms. Uzyskany przebieg ma charakter bardziej uderzeniowy i jest również powtarzalny w kolejnych próbach, jak dla przypadku pobudzenia zapłonikiem elektrycznym. Amplituda ciśnienia jest wyraźnie niższa w porównaniu z przypadkiem pobudzenia zapłonikiem i wynosi ok. 50 kPa. Zapewnia to spełnienie wymagań normowych zalecanych do badania odporności wybuchowej wyrobów klasyfikowanych do klasy EPR1.

## 5. Podsumowanie

W pracy przeanalizowano możliwości generowania impulsów ciśnienia do obciążania elementów konstrukcji narażonych na zagrożenia wybuchowo-pożarowe, związane z działalnością przemysłową, kryminalną lub terrorystyczną. Ustalone normy międzynarodowe narzucają poddawanie badanych elementów impulsom ciśnienia. Czas trwania wynosi kilkadziesiąt milisekund. Do wytworzenia takiego impulsu wymagane jest więc użycie ładunków skondensowanych MW o masie rzędu 1000 kg. Koszty organizacji takiego eksperymentu stanowią największą przeszkodę w prowadzeniu badań odporności wybuchowej elementów konstrukcji budowlanych, takich jak drzwi, okna, żaluzje i in.

Autorzy pracy przedstawili propozycję zastosowania zdecydowanie bardziej ekonomicznej metody generowania impulsów ciśnienia o wydłużonym czasie trwania z zastosowaniem gazowych mieszanin paliwowo-powietrznych. Uzyskiwany impuls ciśnienia w powietrzu nie ma charakteru uderzeniowego, jak w przypadku detonacji skondensowanych MW, jednak charakteryzuje się znacznie większymi wartościami dla zbliżonej masy ładunków.

Wiele zalet praktycznych, w porównaniu z mieszaniną paliwowo-powietrzną, stwierdzono przy zastosowaniu do generacji impulsu ciśnienia stałej mieszaniny pirotechnicznej spalającej się z wysoką, subsoniczną prędkością. Amplitudę ciśnienia, czas trwania i rozkład ciśnienia w czasie można dość precyzyjnie kształtować w zależności od masy ładunku oraz rodzaju pobudzenia. Opracowana metoda generacji impulsu ciśnienia z wykorzystaniem wybuchowo spalającej się mieszaniny pirotechnicznej znalazła zastosowanie do oceny odporności wybuchowej przemysłowych drzwi stalowych oraz okien z szybami zespolonymi.

## LITERATURA

- [1] B. ZYGMUNT, D. BUCZKOWSKI, *Terroryzm bombowy — aspekty techniczne*, XIII Konferencja Naukowo-Techniczna pt. „Problemy rozwoju techniki uzbrojenia”, Rynia, 19-21.05.2004.
- [2] European Standard EN 13124-1, *Windows, doors and shutters — explosion resistance — test method*, Part 1: *Shock tube*, CEN, April 2001.
- [3] Norma Europejska EN 13541, *Szkoło w budownictwie — bezpieczne oszklenie — badanie i klasyfikacja odporności na siłę eksplozji*, CEN, listopad 2000.
- [4] J. HENRYCH, *The dynamics of explosive*, Academia, Prague 1979.
- [5] D. BUCZKOWSKI, B. ZYGMUNT, *Wpływ struktury fizycznej granul saletry amonowej na właściwości wybuchowe saletrolu (ANFO)*, Biul. WAT, 53, 9, 2004, s. 59-73.

B. ZYGMUNT, J. PASZULA, R. REKUCKI

**Methods of generating of pressure impulse in air for evaluation  
of explosive resistance of construction elements**

**Abstract.** For some cases the construction elements used in building and engineering should show special properties, namely the resistance against the shock waves generated by accidental or purposely caused explosions. The most sensitive elements of a construction structure on the action of shock waves are windows, doors, shutters and air condition/ventilation parts. The UE authorities established the procedure for testing and classifying the explosive resistance of mentioned elements. The key problem in the evaluation of explosive resistance is the method of generation of a pressure impulse. In the paper different methods are tested and the shape of pressure impulse is discussed. The new method of generating the air blasts with requirement parameters is described and used for determination of explosive resistance of the building elements.

**Keywords:** pressure pulse, explosive, pressure wave loading, constructions - explosive resistance

**Universal Decimal Classification:** 662.1

