

Materiały Wysokoenergetyczne / High Energy Materials, 2017, 9, 117 – 125; DOI: 10.22211/matwys/0157
ISSN 2083-0165

Copyright 2017 © Institute of Industrial Organic Chemistry, Poland

Praca doświadczalna / Research paper

Modelowanie pola wybuchu mieszanin gazowo-powietrznych w bezpośrednim otoczeniu obłoku paliwowego

Evaluation of blast field of fuel-air mixtures in close proximity to the fuel cloud

Andrzej Papliński,^{1,*} Waldemar Witkowski²⁾

1) Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechatroniki i Lotnictwa, Zakład Inżynierii Bezpieczeństwa, ul. Gen. W. Urbanowicza 2, 00-908 Warszawa, PL

2) Instytut Przemysłu Organicznego, ul. Annopol 6, 03-236 Warszawa, PL

*E-mail: andrzej.paplinski@wat.edu.pl

Streszczenie: Rozpatrzono wybuch obłoku gazowego utworzonego w wyniku uwolnienia acetylenu. Przeprowadzono analizę pola wybuchu na bliskich odległościach od centrum obłoku. Do oceny parametrów pola wybuchu wykorzystane zostały wzory przybliżone oraz wyniki symulacji numerycznych. Rozpatrzono wzory przybliżone przeznaczone do określania parametrów wybuchu skondensowanych materiałów wybuchowych oraz gazowych ładunków objętościowych. Na podstawie porównania z wynikami eksperymentalnej rejestracji wartości nadciśnienia fali podmuchowej przeprowadzona została analiza praktycznej przydatności poszczególnych metod do prognozowania zagrożeń tworzonych przez ładunki objętościowe w bezpośrednim otoczeniu obłoku paliwowego.

Abstract: Detonation of a fuel-air cloud formed as a result of a release of acetylene is investigated. An analysis of the blast field in close proximity to the explosion centre is performed. Analytical formulae based on dimensionless Sachs variables as well as results of numerical simulations, were used to interpret experimentally obtained blast field parameters. Expressions describing overpressure generated by explosion of condensed phase charges, as well as formulae describing the blast pressure generated by detonation of volume gaseous charges, were applied to examinations. A discussion of usability of particular methods in the prognosis of hazard imposed by explosion of clouds of fuel-air mixtures is presented.

Słowa kluczowe: acetylen, gazowe mieszaniny palne, pole wybuchu

Keywords: acetylene, gaseous explosive mixtures, blast field parameters

1. Wprowadzenie

Wybuchy mieszanin gazów palnych z powietrzem pozostają jednym z powszechnych zagrożeń bezpieczeństwa, zarówno odniesieniu do instalacji technicznych, w których następuje przetwarzanie, przechowywanie i transport gazów palnych jak również w odniesieniu do gospodarstw domowych. Niezależnie od kroków organizacyjnych i technicznych podejmowanych w celu zapewnienia bezpieczeństwa eksploatacji układów, w których mogą powstawać atmosfery wybuchowe, całkowite wyeliminowanie potencjalnych zagrożeń nie jest możliwe. Ograniczenie stopnia ryzyka można osiągnąć zmniejszając prawdopodobieństwo wystąpienia niebezpiecznego

zdarzenia lub minimalizując wielkość potencjalnych szkód. Elementem analizy bezpieczeństwa układów technicznych, w których występują mieszaniny gazowo-powietrzne jest ocena potencjalnych parametrów wybuchu. Wartość wyzwolonej energii i charakterystyka parametryczna przemiany pozwalają na prognozowanie zakresu potencjalnych szkód. Przyjęcie założenia o możliwości wybuchu stanowi ograniczenie od góry stopnia zagrożeń pożarowo-wybuchowych.

Jednym z potencjalnych zagrożeń bezpieczeństwa jest wybuch mieszanin gazów technicznych z powietrzem. Oprócz gazu ziemnego używanego w instalacjach domowych oraz do napędzania turbin gazowych, znaczący udział wśród gazów palnych znajdujących się w powszechnym użyciu stanowi acetylen. W wielu zastosowaniach, wykorzystanie palników acetylenowych pozostaje niezastąpionym środkiem obróbki materiałów. W pracy rozpatrzono wybuch obłoku gazowego utworzonego w wyniku uwolnienia acetylenu. Przeprowadzono analizę pola wybuchu z wykorzystaniem metod przybliżonych i zastosowaniem symulacji numerycznej. Na podstawie porównania z wynikami eksperymentalnej rejestracji wielkości nadciśnienia w fali podmuchowej przeprowadzona została analiza praktycznej przydatności poszczególnych metod do prognozowania zagrożeń tworzonych przez mieszaniny gazów palnych z powietrzem.

2. Sformułowanie problemu

Zagadnienia określania stopnia zagrożeń tworzonych przez wybuch mieszaniny gazowo-powietrznej rozważymy na przykładzie analizy pola wybuchu wybranego obłoku paliwowo-powietrzego. W odniesieniu do zarejestrowanych parametrów fali podmuchowej, rozpatrzona zostanie przydatność i adekwatność poszczególnych metod prognozowania pola wybuchu, na podstawie znanego składu chemicznego i objętości chmury paliwowo-powietrznej.

Rozpatrzmy obłok utworzony przez mieszaninę acetylenu z powietrzem. Acetylen pozostaje gazem technicznym o znaczącym obszarze zastosowań. W wielu przypadkach, wykorzystanie palników acetylenowych pozostaje niezastąpionym środkiem obróbki materiałów. Badania przeprowadzone zostały dla mieszaniny zawierającej 15% acetylenu. Objętość obłoku mieszaniny powietrzno-acetylenowej wynosiła $0,371 \text{ m}^3$ (rys. 1).



Rys. 1. Widok balonu i czujnika pomiarowego ($V_a = 0,371 \text{ m}^3$)

Zarejestrowane wartości nadciśnienia w fali podmuchowej w funkcji odległości od centrum wybuchu R przedstawione zostały w tabeli 1.

Tab. 1. Zarejestrowane wartości nadciśnień Δp w fali podmuchowej

R [m]	Δp [kPa]
1,0	188,1
1,5	93,9
2,0	65,7

Pomiary przeprowadzone zostały dla ładunków umieszczonych nad powierzchnią ziemi na dostatecznej wysokości tak, aby wykluczyć oddziaływanie (odbicie, tworzenie stożka Macha) fali podmuchowej z powierzchnią ziemi. Rozpatrywane rejestracje wartości nadciśnienia w fali podmuchowej odpowiadają typowym zakresom nadciśnienia, które tworzą zagrożenia dla osób narażonych na działanie fali podmuchowej (tab. 2).

Tab. 2. Skutki działania nadciśnienia fali podmuchowej na człowieka, zestawienie według danych zamieszczonych w pracy [1]

Skutki	Δp [kPa]
Ciśnienie bezpieczne dla ludzi	$< 10 \div 20$
Uszkodzenie błony bębenkowej	17,5
Lekkie urazy – krótkotrwałe uszkodzenia narządów: słuch, uszkodzenia układu oddechowego (pęknięcie płuc), lekkie potłuczenia	40
Średnie urazy – uszkodzenia całego organizmu, krwotoki, omdlenia, złamania i zwichnięcia kończyn	50
Bardzo ciężkie urazy – próg zagrożenia śmiercią	> 100

Tab. 3. Parametry wyjściowe i charakterystyki przemiany mieszaniny 15% acetyleny z powietrzem, $V = 0,371 \text{ m}^3$

Parametr	Jednostka	Wartość
Zawartość węgla, C	[mol/V]	4,549
Zawartość wodoru, H	[mol/V]	4,549
Zawartość tlenu, O	[mol/V]	5,401
Zawartość azotu, N	[mol/V]	20,378
Entalpia tworzenia mieszaniny, $D_f H$	[kJ/V]	517,25
Ciepło wybuchu w stałej objętości, Q_v	[MJ/kg]	2,75
Energia wybuchu, E_0	[MJ/V]	1,4
Prędkość detonacji, D	[m/s]	2034
Ciśnienie w punkcie Chapman'a-Jouguet'a, p_{C-J}	[MPa]	2,207

Można zwrócić uwagę na dwa aspekty wynikające z przedstawianego w tabeli 2 przypisania potencjalnych urazów do wartości nadciśnienia w obciążającej fali uderzeniowej. Z jednej strony, charakter możliwych szkód związany jest z indywidualnymi charakterystykami obciążanego obiektu, co jest znane również przy określaniu innych zagrożeń (np. związanych z wybuchami jądrowymi). W przypadku narażeń dla ludzi charakter i stopień obrażeń zależy od indywidualnych cech osoby, także od zajmowanej pozycji (ułożenie ciała względem kierunku propagacji zagrożenia). Jednakże, porównanie opisu zmian wywoływanych np. nadciśnieniami o poziome 40 kPa i 50 kPa pozwala sformułować wniosek, że nawet relatywnie niewielka zmiana wartości impulsu obciążającego może prowadzić do znacznego podwyższenia zakresu powstających urazów. Stąd, maksymalnie poprawne rozpoznanie i określenie parametrów zagrożenia, w rozpatrywanym przypadku wartości nadciśnienia powstającego w fali podmuchowej, jest ważnym i znaczącym zadaniem, w zakresie oceny bezpieczeństwa. Oszacowanie energii wybuchu przeprowadzono przyjmując, że w stanie wyjściowym mieszanina znajdowała

się w warunkach normalnych ($T_0 = 29815 \text{ K}$, $p_0 = 0,101325 \text{ MPa}$). Parametry wyjściowe badanej mieszaniny zawierającej 15% udział objętościowy acetylenu oraz obliczone charakterystyki przemiany przedstawione zostały w tabeli 3.

Parametry przemiany określone zostały za pomocą metody minimalizacji potencjału termodynamicznego produktów [2]. Wartość energii wybuchu E_0 przyjęto uwzględniając wkład energii wyzwalanej przez zapalnik elektryczny.

3. Określanie nadciśnienia fali podmuchowej za pomocą wzorów przybliżonych

Wzory przybliżone są szeroko stosowane do interpretacji parametrów fal podmuchowych. Ze względu na znacząco wyższą prędkość małych zaburzeń w produktach detonacji w porównaniu z ośrodkiem (powietrzem) w warunkach normalnych, kształt przestrzenny obłoku gazów powybuchowych ma tendencje do symetryzacji. Według prowadzonych oszacowań i obserwacji eksperymentalnych, obłok produktów detonacji ładunku materiału wybuchowego przyjmuje postać bliską kulistej na promieniu rzędu $(2\div 3)l_m$, gdzie l_m – największy wymiar ładunku (np. długość ładunku cylindrycznego) [3, 4]. Ciśnienie w fali podmuchowej określane jest w funkcji odległości R od centrum wybuchu. Zgodnie z prawem Sachsa, nadciśnienie w fali podmuchowej jest funkcją bezwymiarowej wielkości λ , równanie (1)

$$\lambda = \frac{R}{R_0} \quad (1)$$

gdzie R_0 – tzw. zredukowany promień wybuchu, równanie (2)

$$R_0 = \sqrt[3]{\frac{E_0}{p_0}} \quad (2)$$

gdzie E_0 – energia wybuchu, p_0 – ciśnienie otoczenia.

W wielu praktycznych zastosowaniach parametry pola wybuchu wyrażane są względem zmiennej, która określana jest w odniesieniu do masy ładunku wybuchowego (m), np. w odniesieniu do trotylu (TNT) – równanie (3a)

$$Z_{\text{TNT}} = \frac{R}{\sqrt[3]{m_{\text{TNT}}}} \quad (3a)$$

Zastąpienie wielkości wydzielonej energii wartością masy ładunku jest pod względem fizycznym równoważne, jednakże tak określona zmienna Z musi być odniesiona do rodzaju materiału wybuchowego, którego pole rozpatrujemy. Zmienna Z zdefiniowana we wzorze (3a) odpowiada ładunkowi trotylu. Wykorzystanie wzoru zdefiniowanego dla danego materiału wybuchowego (TNT) do ładunków sporządzonych z innych materiałów wybuchowych wymaga określenia równoważnika trotylowego, według równania (3b)

$$\xi_{\text{exp}} = \frac{E_{\text{exp}}}{E_{\text{TNT}}} \quad (3b)$$

Równoważnik trotylowy określany jest poprzez porównanie energii wybuchu jednostki masy danego materiału z energią wydzielaną w czasie wybuchu ładunku trotylu, co w sposób bezpośredni wynika z prawa Sachsa.

Wykorzystanie wzorów charakteryzujących pole wybuchu ładunków trotylu związane jest dużym materiałem eksperymentalnym, który został zebrany w okresie, gdy trotyl był dominującym materiałem wykorzystywanym do sporządzania praktycznie stosowanych ładunków. Szeroko stosowane wzory Sadowskiego [1, 3, 4] mają postać

$$\Delta p = 0,754 \frac{m_{\text{TNT}}^{1/3}}{R} + 2,457 \frac{m_{\text{TNT}}^{2/3}}{R^2} + 6,5 \frac{m_{\text{TNT}}}{R^3} \quad (4)$$

$$[R] = m, \quad 1 < \frac{R}{m_{\text{TNT}}^{1/3}} < 10 \quad [\Delta p] = \text{atm}$$

W pracy [5] zamieszczony został wzór (5) przeznaczony do określania nadciśnienia w fali podmuchowej o postaci

$$\Delta p = 10g \left(7 \frac{m_{\text{TNT}}}{R^3} + 2,7 \frac{m_{\text{TNT}}^{2/3}}{R^2} + 0,84 \frac{m_{\text{TNT}}^{1/3}}{R} \right) \quad [\text{kPa}] \quad (5)$$

gdzie g – przyspieszenie ziemskie ($g = 9,8065 \text{ m/s}^2$). Wzór (5) wykorzystywany jest w szczególności do określania stref bezpieczeństwa w czasie prowadzenia prac strzałowych [6].

W przypadku wybuchu ładunku gazowego, analogiczna wartość energii wydzielana jest w znacznie większej objętości, w porównaniu ze skondensowanymi materiałami wybuchowymi. Prowadzi to do zmian w wielkości i charakterze zależności parametrów fali podmuchowej od centrum wybuchu. Jednymi z pierwszych wzorów opartych na szerokim materiale doświadczalnym są wzory (6) opracowane przez Kogarko i innych (cytowane w [3])

$$\Delta p = 0,06 \frac{E_0^{1/3}}{R} + 0,014 \frac{E_0^{2/3}}{R^2} + 0,0025 \frac{E_0}{R^3} \quad \text{dla} \quad \frac{R}{E_0^{1/3}} > 0,3 \quad (6)$$

$$[R] = m, \quad [E_0] = \text{kcal}, \quad [\Delta p] = \text{atm}$$

Kolejnym przybliżeniem, opartym również na bardzo obszernym materiale eksperymentalnym są wzory (7) podawane przez Dorofeeva [7]

$$\frac{\Delta p}{P_0} = 0,34 \lambda^{-4/3} + 0,062 \lambda^{-2} + 0,0033 \lambda^{-3} \quad (7)$$

$$0,33 < \lambda < 3,77$$

Porównanie parametrów fali podmuchowej rozpatrywanego ładunku objętościowego wyznaczonych za pomocą wzorów przybliżonych zamieszczone zostało w tabeli 4.

Tab. 4. Prognozowane wartości nadciśnienia fali podmuchowej obłoku gazowego na małej odległości od centrum wybuchu

R , [m]	Nadciśnienie Δp , [kPa], obliczone według wzoru				Δp , eksp. [kPa]
	(4)	(5)	(6)	(7)	
1,00	367,0	386,8	195,3	151,5	188,1
1,25	217,3	229,5	120,9	107,7	–
1,50	144,6	153,0	83,6	81,9	93,9
1,75	104,2	110,4	62,3	65,2	–
2,00	79,4	84,3	48,8	53,5	65,7
2,25	63,0	67,0	39,7	45,1	–

Charakterystyczne dla wzorów opisujących pole wybuchu ładunków skondensowanych są wyższe wartości nadciśnienia, zarówno w odniesieniu do wzorów przeznaczonych do interpretacji ładunków gazowych jak i wyników eksperymentu. W przypadku wybuchu ładunku skondensowanego materiału wybuchowego ciśnienie wymuszającej fali detonacyjnej na granicy PD/powietrze jest rzędu 20-30 GPa (21 GPa dla trotylu). Stąd,

nadciśnienie w bliskim otoczeniu ładunku jest znacznie większe niż w przypadku ładunków objętościowych. Wzory (6) i (7) przeznaczone do opisu fal podmuchowych ładunków paliwowo-powietrznych różnią się przewidywaną dynamiką malenia ciśnienia. Gradient ciśnienia prognozowany przez wzór opracowany przez Kogarko i współpracowników (wz. (6)) jest większy (następuje szybszy spadek) niż w przypadku wzoru podanego przez Dorofeeva (wz. (7)).

W tabeli 5 przedstawione zostały procentowe wartości różnic pomiędzy wielkościami nadciśnienia prognozowanymi przez wzory (4÷7) a wartościami otrzymanymi z rejestracji eksperymentalnych.

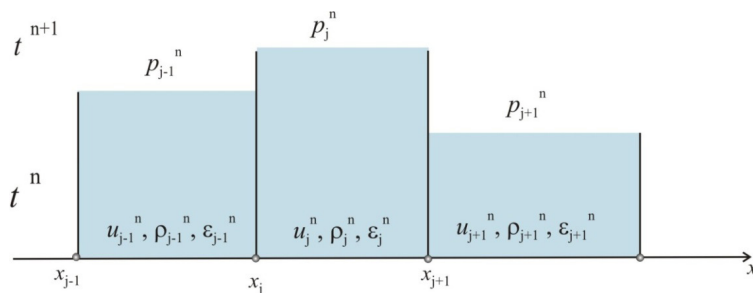
Tab. 5. Różnice procentowe pomiędzy wielkościami nadciśnienia w fali podmuchowej określanymi ze wzorów (4 ÷ 7) a wartościami eksperymentalnymi

R , [m]	Δp , eksp. [kPa]	Δp , wz. (4) [%]	Δp , wz. (5) [%]	Δp , wz. (6) [%]	Δp , wz. (7) [%]
1,00	188,1	95,1	105,6	3,85	-19,5
1,50	93,9	54,0	63,0	-10,9	-12,8
2,00	65,7	20,8	28,2	-25,7	-18,5

Występujące różnice potwierdzają zasadność poszukiwania metod określania pola wybuchu z wykorzystaniem symulacji numerycznych, zwłaszcza dla stref (promieni) bliskich centrum wybuchu.

4. Wyznaczanie parametrów fali podmuchowej za pomocą symulacji numerycznych

Symulacja numeryczna procesu rozprzestrzeniania się fali uderzeniowej wytworzonej detonacją mieszaniny paliwowo-powietrznej przeprowadzona została z wykorzystaniem schematu różnicowego o podwyższonej dokładności. Zastosowanie symulacji numerycznej do wyznaczenia parametrów przepływu ośrodka ciągłego prowadzi do podziału ośrodka na dyskretne komórki numeryczne (rys. 2). Istotnym zadaniem metody symulacyjnej jest aproksymacja nieciągłych parametrów ośrodka tak, aby wyznaczone rozwiązanie w sposób możliwie poprawny odtwarzało rzeczywiste parametry przepływu.



Rys. 2. Podział środka ciągłego na dyskretne podobszary, dla których wykonywana jest numeryczna symulacja przepływu

Na rysunku 2 przedstawiony został stan rozpatrywanego ośrodka w poszczególnych komórkach numerycznych w chwili czasu t^n . Zadaniem algorytmu numerycznego jest wyznaczenie wartości poszczególnych parametrów, ciśnienia p , gęstości właściwej ρ , prędkości masowej u i wartości energii wewnętrznej ϵ na kolejnym kroku czasowym t^{n+1} . W pracy do symulacji ruchu ośrodka gazowego zastosowana została metoda Godunowa o podwyższonej dokładności [2]. Istotą metody jest rozwiązywanie zadania o rozpadzie dowolnej nieciągłości na granicy poszczególnych komórek numerycznych, w kolejnych krokach czasowych. Jest to metoda szczególnie dogodna w przypadkach, gdy ze względu na charakter zagadnienia, w polu przepływu występują lub może dojść

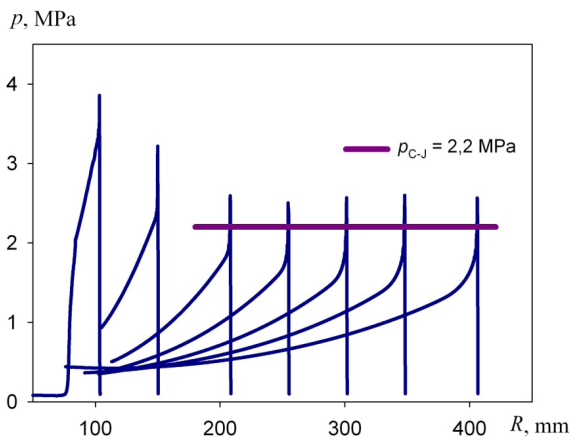
do uformowania powierzchni silnej nieciągłości. Ponieważ na każdym kroku czasowym na granicach komórek rozważane jest powstawanie mikrofal uderzeniowych, jeżeli w przepływie wystąpi tendencja do uformowania fali silnej nieciągłości, zostanie ona uchwycona i wyodrębniona przez schemat numeryczny.

Rozpatrywany schemat numeryczny zastosowany został do rozwiązania dwóch kolejno następujących po sobie etapów procesu. W pierwszej kolejności przeprowadzona została symulacja rozwoju fali detonacyjnej w rozpatrywanej mieszaninie reaktywnej. Ze względu na dużą zmienność parametrów ruchu i stanu w obrębie detonującego materiału reaktywnego, wykorzystanie symulacji numerycznej opartej o rozwiązanie zadania o rozpadzie dowolnej nieciągłości pozwala na uzyskanie poprawnego rozkładu ciśnienia wewnątrz obłoku gazowego w chwili wyjścia fali detonacyjnej na granicę kontaktową z powietrzem. Rozwiązanie uzyskane za pomocą symulacji numerycznej tworzy warunek początkowo-brzegowy do wyznaczenia charakterystyk fali podmuchowej generowanej w otaczającym powietrzu.

Poprawne odtworzenie procesu detonacji wymaga uwzględnienia kinetyki przereagowania materiału energetycznego. W prowadzonych w pracy symulacjach do opisu przereagowania acetylenu wykorzystywane było globalne równanie szybkości reakcji. Wykorzystywano uproszczone równania przereagowania węglowodorów w postaci przedstawionej w pracy [7], równanie (8)

$$\dot{[y_{CH}]} = -A \cdot e^{-\frac{E_A}{RT}} [y_{CH}]^{a_{CH}} [y_{O_2}]^{b_{O_2}} \quad (8)$$

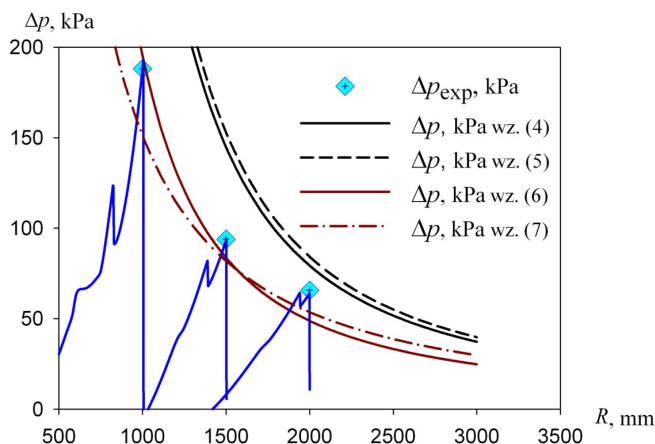
gdzie E_A – energia aktywacji, y_{CH} , y_{O_2} – stężenia molowe paliwa i utleniacza [mol/cm^3], A , a_{CH} , b_{O_2} – współczynniki liczbowe. W przypadku acetylenu reakcja przemiany nie jest jednostopniowa [8, 9]. Przyjęcie jednostopniowego przybliżenia prowadzi do przyspieszenia procesu wydzielania ciepła, strefa reakcji zostaje zawężona, w stosunku do rzeczywistego przebiegu. W celu dokonania przybliżenia jednostopniowym schematem przereagowania przyjęto $E_A = 70 \text{ kJ/mol}$, $\log A = 13,5$ na podstawie [9], natomiast według oszacowań zamieszczonych w [7] przyjmowano $a = 0,25$, $b = 1,5$. Wyniki symulacji przereagowania mieszaniny acetylenu z powietrzem przedstawione zostały na rysunku 3.



Rys. 3. Numeryczna generacja fali detonacyjnej w badanym obłoku gazowym

Otrzymane rezultaty, przedstawione na rysunku 3, pozwalają wnioskować, że stopień przyjętych przybliżeń pozwolił na uzyskanie poprawnej charakterystyki procesu przereagowania rozpatrywanego obłoku. Uzyskano poprawną wartość ciśnienia w płaszczyźnie Chapman'a-Jouguet'a, poprawnie odtworzona została prędkość detonacji.

Wyniki numerycznej symulacji pola ciśnienia generowanego wybuchem rozpatrywanego obłoku acetylenowo-powietrznego przedstawione zostały na rysunku 4.



Rys. 4. Numeryczna symulacja rozprzestrzeniania się fali uderzeniowej w powietrzu otaczającym rozpatrywany obłok gazowy

Przebiegi nadciśnienia otrzymane w wyniku symulacji numerycznej dobrze odtwarzają wartości otrzymane z rejestracji eksperymentalnych. Na rysunku 4 naniesione zostały również wyniki aproksymacji pola nadciśnienia za pomocą wzorów przybliżonych (4)÷(7). W przebiegu pola nadciśnienia otrzymanym za pomocą symulacji numerycznych występują podwójne wierzchołki, widoczne zwłaszcza dla fal, których czoło osiągnęło odpowiednio 1,5 m i 2 m. Wystąpienie drugiej kulminacji następuje w wyniku odbicia piku ciśnienia związanego z frontem fali detonacyjnej od centrum symetrii ładunku. Obserwowane niejednorodności w obrębie pola nadciśnienia, jakie występują w bezpośredniej bliskości ładunku wybuchowego potwierdzają przydatność i potrzebę wykorzystywania symulacji numerycznej do rozpoznania obciążeń powstających w bliskich strefach wybuchu. W zależności od wielkości (wymiarów) ładunku wybuchowego pojęcie bliskiej strefy wymaga ściślejszego określenia. Bez wątpienia będzie występował w tym przypadku efekt skali.

5. Podsumowanie

W pracy przeprowadzona została analiza pola wybuchu wytwarzanego w wyniku przereagowania przykładowego obłoku paliwowo-powietrznego. Przeprowadzono oceny z wykorzystaniem wzorów przybliżonych, przedstawione zostały wyniki symulacji numerycznej. Przedstawione wyniki pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- Do oceny zagrożeń tworzonych wybuchem mieszanin gazów palnych z powietrzem mogą być wykorzystywane wzory wyprowadzane na podstawie analizy wybuchu ładunków skondensowanych materiałów wybuchowych, jak np. wzory Sadowskiego i inne. Podstawą zasadności ich stosowania jest energetyczna równoważność energii wybuchu ładunku skondensowanego materiału wybuchowego i rozpatrywanego ładunku objętościowego. W obszarze małych odległości od centrum wybuchu, dla zredukowanych promieni wybuchu o wartościach jak rozpatrywane w pracy, wzory wyprowadzone dla skondensowanych materiałów wybuchowych dają wartości zawyżone. Mogą być przydatne do szacowania maksymalnego stopnia zagrożenia.
- Zależności przeznaczone do oceny fal nadciśnienia wytwarzanych wybuchem ładunków objętościowych przedstawiane w pracach [3] (Kogarko, wz. (6)) i [7] (Dorofeev, wz. (7)) pozwalają na uzyskanie lepszej zgodności obliczanego nadciśnienia z wynikami rejestracji eksperymentalnych. Gradient ciśnienia prognozowany przez zależność (6) jest większy (następuje szybszy spadek) niż w przypadku przewidywanym przez wzór (7).
- Symulacja numeryczna pozwala na pełną interpretację pola wybuchu. Zastosowanie analiz symulacyjnych

- jest niezbędne zwłaszcza w bliskim sąsiedztwie ładunku, gdzie rozpoznanie potencjalnej zdolności niszczącej ładunku jest szczególnie istotne.
- d) W ocenie zagrożeń powstających w wyniku niekontrolowanego uwolnienia substancji palnych do atmosfery istotną dla oceny stopnia zagrożenia jest prognoza wielkości energii uwalnianej w mechanizmie wybuchowym. Ocenia się, że w przypadku awarii zachodzącej wg mechanizmu BLEVE, działanie niszczące wywiera 10-20% dostępnej energii, jaka mogłaby zostać wydzielona w wyniku pełnego przereagowania zawartego w obłoku paliwa [11, 12].
- e) Narzędziem pozwalającym na rozpoznanie przemiany obłoku o niejednorodnym przestrzennym rozkładzie paliwa, w warunkach słabej inicjacji, jest symulacja numeryczna.

Literatura

- [1] Trzcziński W.A. 2016. Przegląd metod obliczania parametrów fal podmuchowych. *Problemy Mechatroniki: Uzbrojenie, Lotnictwo, Inżynieria Bezpieczeństwa* 7 (1): 61-78.
- [2] Papiński A. 2009. *Modelowanie rozwoju spalania i wybuchu w niejednorodnych fizycznie ośrodkach reaktywnych*. Warszawa: Wojskowa Akademia Techniczna; ISBN 978-83-61486-35-0.
- [3] Orlenko L.P., (red). 2004. *Fizyka Wzrywa*. T.1, Moskwa : Fizmatlit; ISBN 9785922102192.
- [4] Cudziło S., Maranda A., Nowaczewski J., Trębiński R., Trzcziński W.A. 2000. *Wojskowe materiały wybuchowe*. Częstochowa : Wydawnictwo Wydziału Metalurgii i Inżynierii Materiałowej Politechniki Częstochowskiej; ISBN 83-87745-11-1.
- [5] Onderka Z. 1986. *Technika strzelnicza w górnictwie odkrywkowym – Fizyka detonacji materiałów wybuchowych*. Skrypt AGH nr 1009, Kraków; ISSN 0239-6114.
- [6] Machowicz M, Papiński A. 2007. Analiza pola wybuchu i określanie ładunków równoważnych dla górniczych materiałów wybuchowych. *Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie* 9: 51-55.
- [7] Dorofeev S.B. 1997. Blast effect of confined and unconfined explosions shock waves. In: Sturtevant B, Shepherd J, Hornung H, editors. *Proceedings of the 20th ISSW, Scientific Publishing Co., Singapore*: vol. 1, pp.77-86; ISBN 978-9810229573.
- [8] Westbrook C.K., Dryer F.L. 1984. Chemical kinetics modelling of hydrocarbon combustion. *Prog. Energy Comb. Sci.* (10): 1-57.
- [9] Karasevich, Yu.K. 2009. Kinetics of Chemical Ionization in Shock Waves: IV. Kinetic Model of Ionization in Acetylene Oxidation. *Kinetics and Catalysis* 50 (5): 617-626.
- [10] Varatharajan B., Williams F.A. 2001. Chemical-Kinetic Descriptions of High-Temperature Ignition and Detonation of Acetylene-Oxygen-Diluent Systems. *Combustion and Flame* 125: 624-645.
- [11] Baker W.E., Cox P.A., Westine P.S., Kulesz J.J., Strehlow R.A. 1983. *Explosion hazards and evaluation*. Oxford, New York, Amsterdam : Elsevier; ISBN 0-444-42094-0.
- [12] Dewey M.C., Dewey J.M. 2014. The physical properties of the blast wave produced by a stoichiometric propane/oxygen explosion. *Shock Waves* (24): 593-601.

Received: October 26, 2017

Revised: December 12, 2017

Published: December 28, 2017