

WYBUCHY GAZU W POMIESZCZENIACH ZAMKNIĘTYCH – ROZPOZNANIE CHARAKTERYSTYK I PRZECIWDZIAŁANIE ZAGROŻENIOM

EXPLOSION OF GASEOUS MIXTURES IN COMPARTMENTS – ASSESSING OF CHARACTERISTICS AND HAZARD PREVENTION

dr hab. inż. Andrzej PAPLIŃSKI, prof. WAT

Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa

andrzej.paplinski@wat.edu.pl

Artykuł recenzowany

Streszczenie

W pracy przedstawiane są zagadnienia oceny charakteru i skali potencjalnych zagrożeń, jakie mogą powstać w zamkniętych pomieszczeniach, w których nastąpiło utworzenie mieszaniny paliwowo-powietrznej w wyniku uwolnienia gazów palnych. Przedstawione zostały metody wyznaczania krytycznych wartości stężenia mieszanin gazowo-powietrznych ze względu na zagrożenie pożarem i wybuchem. Rozpatrzone zostały zagadnienia pomniejszania siły wybuchu i skali potencjalnych zniszczeń poprzez wpływanie na materiałowo-przestrzenne warunki rozwoju przemiany.

Słowa kluczowe: mieszaniny gazowe, granice wybuchowości, profilaktyka przeciwwybuchowa

Summary

In the paper hazard of fire and explosion of combustible clouds formed by uncontrolled gas release in compartments is considered. Approximate evaluation of flammability limits is performed. Methods of preventing of uncontrolled events as well as diminishing of explosion upshots due to implementation of venting are outlined.

Key words: Gaseous mixtures, explosion limits, explosion prevention

1. Wprowadzenie

Wybuchy mieszanin gazowo-powietrznych powstałych w wyniku niekontrolowanego uwolnienia gazu ziemnego z instalacji gazowych stanowią jedno z najpoważniejszych zagrożeń, jakie są obecne w codziennym życiu, w miejscu zamieszkania szerokich grup społecznych. Przepisy prawa budowlanego oraz warunki techniczne w sposób szczegółowy określają zasady bezpiecznego montażu instalacji gazowych. Z drugiej strony, niezbędna jest pogłębiona wiedza, która pozwala na rozpoznanie źródeł potencjalnych zagrożeń oraz prognozę skutków, jakie mogą być następstwem zapłonu, rozwoju spalania i wybuchu w mieszaninie powietrzno-gazowej powstałej w wyniku niesprawności lub uszkodzenia zasilania gazowego.

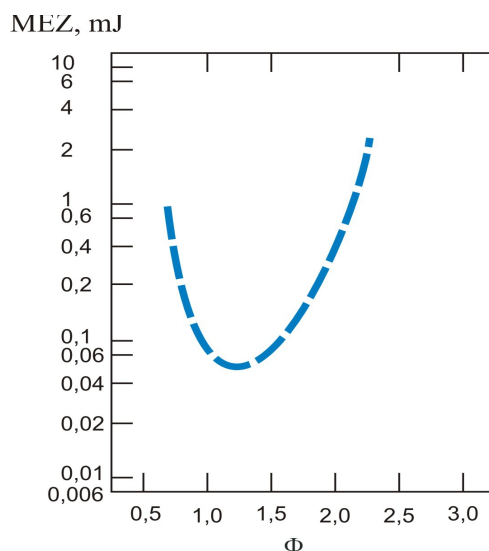
Problematyce spalania i wybuchu mieszanin gazów palnych z powietrzem poświęcona jest obszerna literatura [1÷3] i inne. Zagadnieniem o podstawowym znaczeniu gospodarczym jest wykorzystanie gazów palnych do wytwarzania energii. Około 85% energii wykorzystywanej przez ludzkość wytwarzane jest w procesach spalania [3]. Ze względu na malejącą rolę węgla wzrasta wolumen oraz globalny udział procentowy gazu naturalnego wykorzystywanego do wytwarzania energii w instalacjach ciepłowniczych, jak również do napędzania pojazdów. Zagadnienia bezpieczeństwa stosowania paliwa gazowego w codziennym użytkowaniu mają odmienną specyfikę, w porównaniu z literaturą specjalistyczną poświęconą zagadnieniom budowy turbin gazowych, minimalizacji udziału substancji toksycznych w produktach spalania, ekonomicznej optymalizacji wykorzystania paliwa gazowego. W odniesieniu do paliwa gazowego zagadnienia bezpieczeństwa użytkowania i powstawania zagrożeń w znacznym stopniu dotyczą sytuacji powstających w wyniku niekontrolowanego uwolnienia gazu palnego, gdy wytwarza on z powietrzem mieszaninę palną [4]. Ze względu na różnorodność zastosowań paliwa gazowego potrzeba znajomości podstawowych zagadnień związanych z zagrożeniami tworzonymi przez palne mieszaniny powietrzno-gazowe dotyczy znacznie szerszej grupy ludzi niż zagadnienia budowy i eksploatacji turbin gazowych i innych urządzeń przeznaczonych do wytwarzania energii w wyniku spalania paliwa gazowego.

W pracy przedstawiane są zagadnienia rozpoznania i szacowania podstawowych parametrów, które określają rodzaj i skalę potencjalnych zagrożeń, jakie mogą powstać w pomieszczeniach zamkniętych, w których nastąpiło utworzenie mieszaniny paliwowo-powietrznej w wyniku uwolnienia gazów palnych wykorzystywanych gospodarczo, zwłaszcza w piecach i kuchniach będących na wyposażeniu mieszkań. Przedstawiane są charakterystyki mechanizmów prowadzących do inicjacji zapłonu gazowej mieszaniny palnej.

Przeprowadzono porównanie metod wyznaczania krytycznych wartości stężenia mieszanin gazowo-powietrznych ze względu na zagrożenie pożarem i wybuchem. Rozpatrzone zostały zagadnienia pomniejszania siły wybuchu i skali potencjalnych zniszczeń poprzez wpływanie na materiałowo-przestrzenne warunki rozwoju przemiany.

2. Krytyczne warunki inicjacji zapłonu mieszaniny gazu palnego z powietrzem

Określanie warunków zapłonu jest jednym z najbardziej złożonych zagadnień fizyki spalania [1÷3]. W stanie wyjściowym mieszanina powietrzno-gazowa pozostaje w stanie metastabilnej równowagi termodynamicznej. Zapoczątkowanie przemiany wymaga dostarczenia energii w celu fragmentacji struktury molekularnej wyjściowego materiału palnego. Jednocześnie niezbędne jest podwyższenie energii ośrodka gazowego (zawartego w powietrzu tlenu), który będzie wchodził w reakcje z aktywowanymi molekułami paliwa. Etap fragmentacji molekuł i podgrzania mieszaniny palnej jest procesem endotermicznym. Wydzielenie energii następuje w końcowym etapie przebiegu reakcji spalania, gdy formowane są końcowe produkty przemiany. W przypadku paliw węglowodorowych są to woda i ditlenek węgla. Czynnikiem o znaczeniu zasadniczym, który określa warunki zapłonu, jest wzajemna relacja pomiędzy stężeniami paliwa i utleniacza. W danych warunkach tylko określona ilość paliwa może przereagować, tworząc produkty najbardziej wydajne energetycznie, tj H_2O i CO_2 . W obydwu przypadkach, zarówno przy niedoborze, jak i nadmiarze paliwa, energia wydzielona w wyniku aktywacji krytycznej ilości paliwa wydatkowana jest na podgrzewanie pozostałego ośrodka, który pełni w tym przypadku rolę inertyzatora. Może to być zarówno nieprzereagowany tlen wraz z azotem, w przypadku mieszanin ubogich, lub też nieprzereagowane paliwo, które nie uległo przemianie ze względu na niedobór tlenu. W każdym przypadku zapoczątkowanie spalania wymaga zwiększenia energii dostarczonej do mieszaniny palnej. Typowa zależność krytycznej energii zapłonu od zawartości paliwa w mieszaninie ma postać jak na rysunku 1.

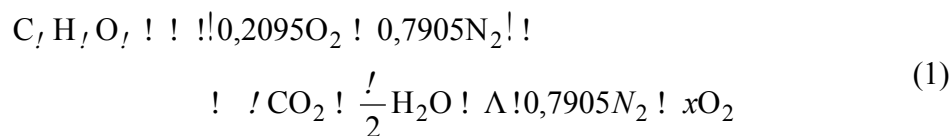


Rys. 1. Zależność minimalnej energii zapłonu od składu chemicznego mieszaniny palnej

Rysunek przedstawia typową zależność minimalnej energii zapłonu (MEZ) mieszaniny gazu palnego z powietrzem. Symbolem ! oznaczony został współczynnik ekwiwalencji mieszaniny. Krzywa wielkości energii zapłonu ma postać paraboli, najniższe wartości minimalnych energii zapłonu występują dla mieszanin o zawartości paliwa nieznacznie większej do składu stechiometrycznego. Charakterystyczny jest intensywny wzrost minimalnej energii zapłonu, w miarę oddalania się od obszaru stężeń bliskich składowi stechiometrycznemu. Dla mieszanek ubogich, gdy ilość paliwa nie wystarcza do pełnego wykorzystywania dostępnego tlenu, strefa minimalnych wartości stężeń paliwa jest relatywnie wąska. W przypadku mieszanek bogatych zapłon jest możliwy, gdy stężenie paliwa jest dwu-trzykrotnie większe od stężenia stechiometrycznego.

W obydwu przypadkach krzywa zależności minimalnej energii zapłonu od stężenia paliwa ma charakter asymptotyczny. Występują graniczne wartości stężeń paliwa, zarówno dla mieszanek bogatych, jak i ubogich, powyżej i poniżej których zapłon mieszaniny gazu palnego z powietrzem praktycznie nie jest możliwy. Kontrola możliwości powstawania mieszanin palnych w granicach palności jest pierwszym narzędziem przeciwdziałania powstawaniu zagrożeń związanych ze spalaniem i wybuchem mieszanin paliwowo-powietrznych.

Współczynnik ekwiwalencji! nazywany jest również współczynnikiem stechiometryczności mieszaniny. W przypadku gazu o ogólnym wzorze chemicznym $C_f H_f O_f$ przereagowanie paliwa z powietrzem zapisać możemy za pomocą wzoru



Gdzie λ oznacza ilość moli powietrza, która uwzięła udział w reakcji, natomiast x jest ilością moli nieprzereagowanego tlenu w przypadku, gdy w rozpatrywanej mieszaninie występuje nadmiar tlenu. Przypadek $x = 0$ odpowiada składowi stechiometrycznemu.

$$\lambda_{\text{stech}} = \frac{1}{0,2095} + \frac{1}{4} + \frac{1}{2} \quad (2)$$

Stosunek masy paliwa do masy powietrza odpowiadający stechiometrycznemu składowi mieszanki określany jest zależnością

$$\left(\frac{F}{A}\right)_{\text{stech}} = \frac{m_f}{\lambda_{\text{stech}} \cdot \rho_{\text{air}}} = \frac{m_f}{\lambda_{\text{stech}} \cdot 28,85} \quad (3)$$

gdzie $m_f = 12,011 + 1,0079 + 15,9994$ g/mol, natomiast masa molowa powietrza określona została przy założeniu, że azot reprezentuje pozostałe składniki, poza tlenem, $\rho_{\text{air}} = 0,2095 \cdot 15,9994 + 0,7905 \cdot 14,0067 = 28,85$ g/mol. W przypadku, gdy gaz palny jest mieszaniną CH_4 i C_3H_8 , które pozostają w stosunku molowym jak 3:1, ogólny wzór składnika palnego możemy zapisać w postaci C_4H_{20} .

Dla dowolnej masy paliwa i dowolnej masy powietrza (skład niestechiometryczny) określić możemy

$$\left(\frac{F}{A}\right) = \frac{m_f}{\lambda \cdot 28,85} \quad (4)$$

Współczynnik ekwiwalencji masowej określany jest następująco [1]

$$\Phi_{\text{mas}} = \frac{\left(\frac{F}{A}\right)}{\left(\frac{F}{A}\right)_{\text{stech}}} \quad (5)$$

Podobnie określony być może współczynnik ekwiwalencji objętościowej [1].

Minimalna energia zapłonu jest wielkością limitującą. Można wyprowadzić następującą definicję: „minimalna energia zapłonu (MEZ) – to najmniejsza energia, przy której następuje zapłon mieszaniny palnej w warunkach optymalnych, ze względu na skład, geometrię, wartości parametrów fizycznych”. Zgodnie z ogólną postacią rysunku 1, wartości minimalnych energii zapłonu mieszanin węglowodorów z powietrzem nie przekraczają jednego milidżula. Minimalne energie zapłonu wybranych paliw zamieszczone zostały w tabeli 1.

Tabela 1. Minimalne energie zapłonu mieszanin wybranych paliw z powietrzem [2, 5]

| Substancja | Minimalna energia zapłonu, mJ | |
|------------|-------------------------------|---------------|
| | wg [5] | wg [2] |
| acetylen | 0,020 | 0,017 – 0,050 |

| | | |
|-------------|-------|--------------|
| metan | 0,280 | 0,28 ! 0,47 |
| propan | 0,250 | 0,26 ! 0,305 |
| heksan | 0,248 | 0,22 ! 0,259 |
| benzen | 0,225 | 0,2 ! 0,68 |
| cykloheksan | 0,223 | |
| wodór | 0,018 | 0,011 ! 0,02 |

Wielkości zamieszczone w pracy [2] podawane z uwzględnieniem statystycznego rozrzutu, jaki związany jest z mechanizmami dostarczenia minimalnej energii zapłonu. Charakterystyczne są trzy wyjątki: acetylen i wodór, w przypadku których $MEZ \approx 0,02$ mJ, oraz dwusiarczek węgla, w przypadku którego minimalna energia zapłonu jest rzędu 0,01 mJ. Podobne wielkości minimalnej energii zapłonu posiadają zarówno węglowodory alifatyczne, jak i o strukturze cyklicznej. Energię rzędu jednego milidżula posiada moneta średniej wartości spadająca z wysokości kilkudziesięciu centymetrów. Oczywiście dla uzyskania zapłonu cała energia kinetyczna monety musiałaby zostać zamieniona w impuls inicjujący, np. iskrę. Natomiast klucz metalowy, który upadając, uderza w ściankę remontowanego zbiornika paliwowego, może wytworzyć iskrę o energii wystarczającej do zapłonu mieszanin par paliwa z powietrzem, jakie powstały w niedostatecznie opróżnionym zbiorniku (odprowadzenie par benzyny). Rozwijający się wybuch może prowadzić do znacznych uszkodzeń i zniszczeń, zerwania pokrywy zbiornika, wytworzenia zagrożenia dla sąsiednich zbiorników [6].

Poprawne jest przyjmowanie, że w przypadku, gdy w zawierającej się w granicach palności mieszaninie wystąpi impuls inicjujący, źródło otwartego ognia, iskra mechaniczna, iskrzenie przewodów lub styków eklektycznych, wyładowanie elektrostatyczne, powstałe źródło prądowe będzie do rozwoju spalania i wybuchu w obszarze wypełnionym mieszaniną palną.

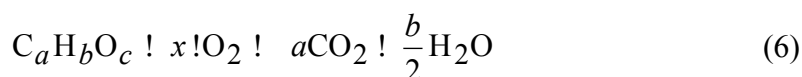
3. Przybliżone metody określania granic palności mieszanin powietrzno-gazowych

Podstawą do rozpoznania granic palności są badania eksperymentalne. Obszerny przegląd i analiza adekwatności pomiarów, zwłaszcza w odniesieniu do eksperymentów prowadzonych w komorach manometrycznych o pojemności 20 dm³ i mniejszej, przedstawiony został w pracy [7]. Wpływ na otrzymane oszacowania mają zarówno warunki fizyczne (geometria układu pomiarowego, metoda inicjacji) prowadzonych rejestracji, jak również przyjęta

definicja efektywnego zapłonu badanej mieszaniny palnej. W praktycznych zastosowaniach niezbędna jest zarówno możliwość dostatecznie szybkiej oceny palnego zakresu stężeń rozpatrywanego materiału palnego, jak również prognozowanie granic palności kompozycji składających się z dwóch lub więcej składników palnych.

W wielu wypadkach oszacowanie można uzyskać, stosując przybliżone metody oceny granic palności. Jedną z najprostszych, a zarazem dostatecznie efektywną jest metoda zaproponowana przez Jonesa [8]. Metodę można określić jako stężeniową. Stosowane są również inne podejścia, w tym metody oparte na określaniu granic palności na podstawie obliczonej temperatury płomienia, które określane są jako metody temperaturowe [9].

Metoda stężeniowa [8] przeznaczona jest przede wszystkim do szacowania granic palności węglowodorów o wzorze ogólnym $C_aH_bO_c$. W przypadku paliwa zawierającego również tlen ilość moli tlenu niezbędna do stechiometrycznego przereagowania z paliwem $C_aH_bO_c$



wynosi

$$x = a + \frac{b}{4} - \frac{1}{2}c \quad (7)$$

Molowy współczynnik stechiometryczny określany jest przy założeniu, że powietrze zawiera 21 % tlenu

$$C_{st} = \frac{n_{fstech}}{n_{fsteach} \cdot n_{air}} \cdot 100\% = \frac{\frac{n_{O_2}}{x}}{\frac{n_{O_2}}{x} \cdot 0,21} \cdot 100\% = \frac{1}{1 \cdot \frac{x}{0,21}} \cdot 100\% \quad (8)$$

Na podstawie tak określonego współczynnika stechiometrycznego C_{st} dolna i górna granice wybuchowości określone są za pomocą wzorów empirycznych

$$DGW = 0,55 \cdot C_{st} \quad (9)$$

$$GGW = 3,5 \cdot C_{st} \quad (10)$$

W tabeli 2 przedstawione zostały wyniki określania dolnej i górnej granicy wybuchowości dla różnych rodzajów paliwa węglowodorowego

Tabela 2. Dolna i górna granica wybuchowości określone metodą stężeniową

| Substancja | Wzór chemiczny | x | C _{st} | DGW | GGW | Wartości eksperymentalne | |
|------------|-------------------------------|------|-----------------|-------|--------|--------------------------|-------|
| | | | % | % | % | DGW | GGW |
| metan | CH ₄ | 2,00 | 9,502 | 5,226 | 33,258 | 5,30 | 15,00 |
| etan | C ₂ H ₆ | 3,50 | 5,660 | 3,113 | 19,811 | 3,00 | 12,50 |
| propan | C ₃ H ₈ | 5,0 | 4,031 | 2,217 | 14,108 | 2,20 | 9,50 |

| | | | | | | | |
|----------------|---------------------------------|------|-------|-------|--------|------|-------|
| butan | C ₄ H ₁₀ | 6,5 | 3,130 | 1,721 | 10,954 | 1,90 | 8,50 |
| pentan | C ₅ H ₁₂ | 8,0 | 2,558 | 1,407 | 8,953 | 1,50 | 7,80 |
| heksan | C ₆ H ₁₄ | 9,5 | 2,163 | 1,19 | 7,570 | 1,20 | 7,50 |
| heptan | C ₇ H ₁₆ | 11,0 | 1,873 | 1,030 | 6,557 | 1,20 | 6,70 |
| oktan | C ₈ H ₁₈ | 12,5 | 1,652 | 0,909 | 5,783 | 1,00 | 6,70 |
| acetylen | C ₂ H ₂ | 2,5 | 7,749 | 4,262 | 27,122 | 2,50 | 80,00 |
| etylen | C ₂ H ₄ | 3,0 | 6,542 | 3,598 | 22,897 | 3,10 | 32,00 |
| propylen | C ₃ H ₆ | 4,5 | 4,459 | 2,452 | 15,605 | 2,40 | 10,30 |
| cyklopropan | C ₃ H ₆ | 4,5 | 4,458 | 2,452 | 15,605 | 2,40 | 10,40 |
| benzen | C ₆ H ₆ | 7,5 | 2,724 | 1,498 | 9,533 | 1,40 | 7,10 |
| aceton | C ₃ H ₆ O | 4,0 | 4,988 | 2,743 | 17,458 | 3,00 | 13,00 |
| tlenek etylenu | C ₂ H ₄ O | 2,5 | 7,749 | 4,262 | 27,122 | 3,00 | 80,00 |

Wyniki obliczeń pozwalają dostrzec zalety, jak również wskazać określone ograniczenia rozpatrywanej metody. Metoda pozwala na poprawne określanie zwłaszcza dolnych granic palności paliw węglowodorowych. Dokładność maleje w przypadku substancji posiadających podwójne wiązania pomiędzy atomami węgla, metoda zupełnie zawodzi w odniesieniu do acetyleny. Poprawność metody zostaje zachowana w przypadku związków cyklicznych, dopuszczalne jest również stosowanie metody w odniesieniu do paliw zawierających w swoim składzie atomy tlenu (aceton, tlenek etylenu). Poza prostymi związkami alifatycznymi dokładność szacowania górnych granic palności jest znacznie ograniczona. W odniesieniu do prognozowania zagrożeń bezpieczeństwa znajomość wartości dolnych granic palności ma niewątpliwie większe znaczenie.

Zarówno badania eksperymentalne, jak i prace nad przybliżonymi metodami oznaczania granic palności prowadzone są zwykle w odniesieniu do indywidualnych substancji chemicznych. Do określania wypadkowych granic palności wykorzystywana jest zwykle metoda Le Chateliera

$$GW_{\text{mix}} = \frac{1}{\sum_i \frac{y_i}{GW_i}} \quad (11)$$

gdzie y_i – udział i -tego składnika; GW_i – granica palności i -tego składnika (odpowiednio dolna lub górna). W przypadku mieszaniny metanu i butanu, które pozostają w stosunku objętościowym jak 3:1, dolna granica wybuchowości wyniesie

$$DGW_{\text{CH}_4, \text{C}_4\text{H}_{10}; 3:1} = \frac{1}{\frac{0,75}{5,226} + \frac{0,25}{1,721}} \% = 3,46 \% \quad (12)$$

w przypadku gdy rozważamy granice palności wyznaczone metodą przybliżoną. Natomiast w przypadku, gdy rozpatrujemy granice wyznaczone eksperymentalnie, stosując metodę Le Chateliera, otrzymujemy

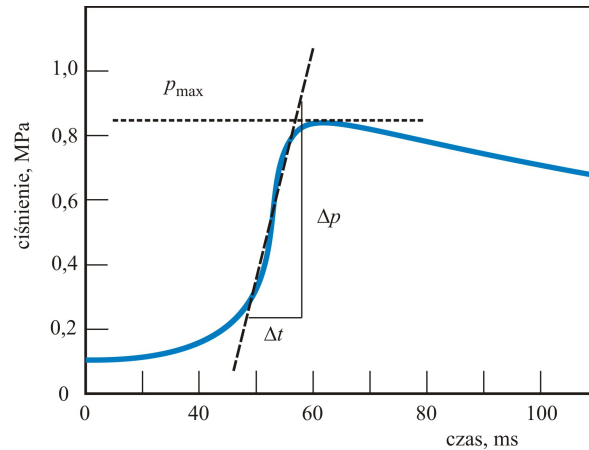
$$DGW_{CH_4, C_4H_{10}; 3:1} \approx \frac{1}{\frac{0,75}{5,30} + \frac{0,25}{1,90}} \% \approx 3,66 \% \quad (13)$$

Zastosowanie przybliżonych metod określania granic palności pozwala na bieżącą kontrolę zakresu dopuszczalnych stężeń mieszanin paliwowo-powietrznych.

4. Mechanizmy rozwoju oraz przeciwdziałanie powstawaniu zagrożeń

W przypadku zapłonu gazowej mieszaniny palnej, podstawowym mechanizmem przemieszczania się strefy przereagowania jest laminarna fala spalania. Niejednorodności przestrzenne i czasowe impulsu inicjującego, niestabilność frontu płomienia prowadzą do turbulizacji płomienia. Wyniki obszernych badań eksperymentalnych i teoretycznej analizy mechanizmów rozwoju, akceleracji i wygaszania płomieni przedstawione zostały w monografii [10]. Prędkość laminarnych fal spalania w typowych mieszaninach węglowodorów z powietrzem jest rzędu 30! 60 cm/s [1, 2]. Również w przypadku przyspieszenia powodowanego rozwojem niestabilności i struktur turbulentnych prędkość przemieszczania się czoła strefy spalania pozostaje znacznie mniejsza od prędkości dźwięku. W przypadku spalania chmury paliwowo-powietrznej znajdującej się w otwartej przestrzeni elementarne fale nadciśnienia odprowadzają energię z obszaru przereagowania paliwa, proces spalania przebiega dość szybko, nie jest jednak związany z wytworzeniem niszczących fal nadciśnienia (fal uderzeniowych).

Odmienna sytuacja występuje w przypadku spalania mieszaniny palnej w przestrzeni zamkniętej. Spalanie kolejnych porcji paliwa prowadzi do wzrostu ciśnienia w całej objętości zajmowanej przez mieszaninę palną. Wzrost ciśnienia oraz wzrost energii wewnętrznej, spowodowany brakiem odprowadzenia energii poza objętość, w której przebiega przemiana, prowadzą do wzrostu temperatury. Ze względu na to, że szybkość reakcji chemicznych zależy od temperatury w sposób wykładniczy, na określonym etapie rozwoju procesu następuje gwałtowne przyspieszenie szybkości spalania mieszaniny. Wielkość ciśnienia w objętości zajmowanej przez mieszaninę gwałtownie wzrasta, dążąc do ciśnienia maksymalnego. Jakościowy przebieg zmian ciśnienia w czasie spalania mieszaniny palnej w przestrzeni zamkniętej przedstawiony został na rysunku 2.



Rys. 2. Narastanie ciśnienia w przypadku spalania mieszaniny palnej w przestrzeni zamkniętej

Etap intensywnych zmian ciśnienia jest istotną charakterystyką paliwa i układu, w którym przemiana zachodzi. Określa się wartość pochodnej, która charakteryzuje szybkość narastania ciśnienia

$$\left. \frac{dp}{dt} \right|_{\max} \approx \frac{p}{t} \quad (\text{rysunek 2}) \quad (14)$$

Stwierdzono doświadczalnie, że w dużym zakresie zmian objętości zbiornika V stałą wartość zachowuje współczynnik

$$K_{st} \approx \left. \frac{dp}{dt} \right|_{\max} \cdot V^{1/3} \quad (15)$$

Wartości K_{st} i p_{\max} dla wybranych gazów palnych przedstawione zostały w Tabeli 3

Tabela 3. Parametry charakteryzujące wybuchowość gazów [11]

| Substancja | Ciśnienie maksymalne p_{\max} , MPa | Indeks deflagracji, K_{st} |
|------------------|--|---------------------------------|
| metan | 0,71 | 55 |
| etan | 0,78 | 106 |
| propan | 0,79 | 100 |
| pentan | 0,78 | 104 |
| alkohol metylowy | 0,75 | 75 |
| wodór | 0,68 | 550 |

Zwraca uwagę wysoka dynamika przereagowania wodoru. Praktycznie zapłon mieszanin węglowodorowo-powietrznych prowadzi do wybuchu. W porównaniu z głównym łańcuchem węglowodorów dynamika spalania metanu jest nieco mniejsza. Przykładowe skale ciśnienia i

czasowa na rysunku 2 dobrane zostały tak, aby odpowiadały typowym wartościom charakteryzującym wybuchowość gazów będących składnikami gazu ziemnego (Tabela 3).

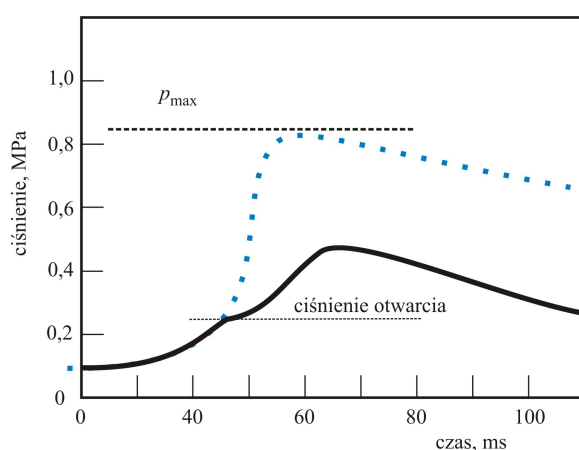
W przeciwdziałaniu zagrożeniom tworzonym przez niekontrolowane spalanie mieszanin gazowo-powietrznych wyróżnić można trzy obszary działań profilaktycznych:

- przeciwdziałanie powstawaniu mieszanin gazowo-powietrznych w palnym zakresie stężeń paliwa;
- zapobieganie i usuwanie źródeł zapłonu;
- pomniejszanie potencjalnych skutków zdarzenia.

Do kontroli niebezpiecznych stężeń paliwa w mieszaninie paliwowo-powietrznej może być wykorzystana przedstawiona w pracy przybliżona metoda określania górnej i dolnej granicy wybuchowości.

Uwzględnienie krytycznych wielkości energii zapłonu charakteryzuje skalę staranności, jaka musi towarzyszyć przeglądowi wyposażenia i dopuszczeniu do rodzajów prac, jakie mogą być wykonywane w potencjalnej obecności atmosfery palnej.

W przypadku wybuchu w objętości zamkniętej, we wszystkich praktycznie układach, w których przewidywana jest możliwość wystąpienia zagrożenia wybuchowego, projektowane i stosowane są zawory dekompresyjne, które zapewniają redukcję ciśnienia wybuchu. Zadziałanie zaworu zapobiega kumulacji ciśnienia, nie dochodzi do osiągnięcia ciśnienia maksymalnego. Ilustracja charakteru zmiany ciśnienia, jaka następuje w przypadku zadziałania otworu dekompresyjnego przedstawiona została na rysunku 3.



Rys. 3. Wpływ zadziałania otworu dekompresyjnego na dynamikę zmian ciśnienia w przypadku wybuchu w przestrzeni zamkniętej

W urządzeniach technicznych otwory dekompresyjne mogą być przekrywane elementami rozrywnymi lub klapami [2]. Konstrukcja systemów dekompresyjnych, dobór wielkości powierzchni otworu oraz siły (ciśnienia) jego otwarcia są ściśle związane z charakterem

układu technicznego, dla potrzeb którego, jako jego część, otwór dekompresyjny jest projektowany i wykonywany. W przypadku mieszkań praktyczny upust ciśnienia realizowany jest w następstwie zniszczenia oszklenia, co prowadzi do wypływu części reagującego medium na zewnątrz. Analiza dynamiki redukcji ciśnienia w przypadku wybuchu mieszaniny gazowej w pomieszczeniu mieszkalnym przedstawiona została w pracy [12]. Zagadnienia te będą przedmiotem dalszych prac.

5. Wnioski

W pracy przedstawione zostały zagadnienia oceny charakteru i skali potencjalnych zagrożeń, jakie mogą powstać w zamkniętych pomieszczeniach, w których nastąpiło utworzenie mieszaniny paliwowo-powietrznej w wyniku uwolnienia gazów palnych. Rozpatrzone zostały zagadnienia określania krytycznych wartości stężenia czynnika palnego mieszanin w mieszaninach gazowo-powietrznych ze względu na zagrożenie pożarem i wybuchem. Przedstawiono i przeprowadzono analizę dokładności przybliżonej metody określania górnej i dolnej granicy palności mieszanin związków węglowodorowych z powietrzem. Rozpatrzone zostały zagadnienia pomniejszania siły wybuchu i skali potencjalnych zniszczeń poprzez wpływanie na materiałowo-przestrzenne warunki rozwoju przemiany.

Bibliografia

1. Bartknecht W., 1993, *Explosionschutz*, Springer-Verlag, New York.
2. Borysiewicz M., Furtek A., Potemski S., 1996, *Poradnik metod ocen ryzyka związanego z niebezpiecznymi instalacjami procesowymi*. Dodatek B: *Ocena skutków uwolnień substancji palnych i wybuchowych*, <http://www.MANHAZ.cyf.gov.pl/poradnik>.
3. Britton L.G., 2002, *Two hundred years of flammable limits*, „Process Safety Progress”, t. 21, nr 1, s. 1–11.
4. Chacińska M., 2013, *Analiza zagrożeń powstających podczas transportu, magazynowania i dystrybucji paliw płynnych*, praca dyplomowa, Wydział Mechatroniki i Lotnictwa WAT, Warszawa.
5. Glassman I., 1996, *Combustion*, Academic Press, San Diego.
6. Hyży T., 2014, *Wybuch gazu w budynkach mieszkalnych. Wybuch wentylowany*, „Biuletyn WAT”, vol. LXIII, nr 3, s. 159–173.

7. Jarosiński J., Veyssiere B., 2009, *Combustion Phenomena, Selected Mechanisms of Flame Formation, Propagation, and Extinction*, CRC Press, Boca Raton.
8. Jones J.C., 1993, *Combustion Science: Principles and Practice*, Millenium Books, Newtown, Australia.
9. Kowalewicz A., 2000, *Podstawy procesów spalania*, WNT, Warszawa.
10. Law Ch.K., 2006, *Combustion Physics*, Cambridge University Press, New York.
11. *Spalanie i paliwa*, 2002, Kordylewski W. (red.), Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
12. Zhao F., Rogers W.J., Mannan M.S., 2010, *Calculated fame temperature (CFT) modeling of fuel mixture lower flammability limits*, „Journal of Hazardous Materials”, t. 174, s. 416–423.