

dr inż. **Wojciech JAROSZ**

mgr inż. **Zdzisław SALAMONOWICZ**

Szkoła Główna Służby Pożarniczej

Zakład Ratownictwa Chemicznego i Ekologicznego

## **WYBRANE ASPEKTY AWARII Z UDZIAŁEM LPG – AKTUALNE PROBLEMY BADAWCZE<sup>1</sup>**

### **Same aspects of accidents involving LPG - current research problems**

#### **Streszczenie**

Liczba awarii z udziałem gazu LPG zwiększają się każdego roku. Następstwem tego faktu jest zwiększenie ilości działań ratowniczych prowadzonych przez jednostki Państwowej Straży Pożarnej. Złożoność zjawisk występujących podczas tego typu awarii prowadzi do konieczności dokładnego ich poznania. Wynika to przede wszystkim z potrzeby zachowania wysokich standardów bezpieczeństwa dla ratowników i skuteczności wybranej technologii ratowniczej. Artykuł omawia aktualne problemy związane z mechanizmami awarii zbiorników ciśnieniowych magazynujących LPG, szczególnie zagadnienia przemian termodynamicznych gazu w zbiorniku w wyniku oddziaływania promieniowania cieplnego od pożaru strumieniowego.

#### **Summary**

Number of accidents involving LPG has been increasing each year. The corollary of this fact is to enhance the rescue operations conducted by the State Fire Service units. The complexity of the phenomena occurring during this type of failure leads to the need for thorough understanding. This is mainly due to the need to maintain high standards of safety and efficacy of emergency rescue technology chosen. The article discusses the current problems associated with the mechanisms of failure of LPG storage tank pressure, particularly issues of thermodynamic processes of gas in the tank as a result of the impact of thermal radiation, from the jetfire.

**Słowa kluczowe:** gaz LPG, pożar strumieniowy, przemiany termodynamiczne, zbiornik ciśnieniowy

**Key words:** LPG gas, jetfire, thermodynamic processes, tank pressure

---

<sup>1</sup> Sytrony w druku: 73-76; pages in print: 73-76.

## **Wprowadzenie**

Dynamiczny rozwój rynku alternatywnych paliw stworzył sytuację, że stosowanie LPG jako paliwa samochodowego rozwinęło się na niespotykaną dotąd skalę. Zwiększyła się liczba użytkowników dróg poruszających się samochodami napędzanymi silnikami spalającymi LPG. Zwiększyła się także ilość stacji tankujących płynny gaz. Również gospodarstwa domowe w większym stopniu niż kiedyś zaczęły stosować, jako czynnik grzewczy w instalacjach, gaz propan-butan. Te wszystkie działania doprowadziły do zwiększenia ilości gazu przewożonego po drogach publicznych w ilościach masowych, jako zaopatrzenie dla coraz liczniejszych odbiorców. Gaz propan-butan w celach komercyjnych transportuje się i magazynuje w cienkościennych zbiornikach ciśnieniowych o różnych wielkościach (butle turystyczne, domowe, przemysłowe, przydomowe zbiorniki gazu, cysterny samochodowe i kolejowe, zbiorniki magazynowe w zakładach przemysłowych). Pojemności tych zbiorników zawierają się w przedziale od paru  $\text{cm}^3$ , aż do tysięcy  $\text{m}^3$ . Awarie będące następstwem wypływu gazu z takich zbiorników różnić się będą czasem trwania oraz możliwymi skutkami: począwszy od zagrożenia lokalnego do powodującego niebezpieczeństwo wielu ludzi znajdujących się na znacznym obszarze.

Zwiększająca się z roku na rok ilość ciśnieniowych butli gazowych powoduje zwiększenie się zagrożenia wystąpienia awarii z tym związanych. Awarie takie mają miejsce w gospodarstwach domowych (głównie butle 11 kg) oraz w działalności komercyjnej. Mogą one prowadzić do określonych poważnych skutków materialnych i obrażeń ludzi. Skutki awarii można przewidzieć wykorzystując znane i sprawdzone scenariusze sytuacji awaryjnych. Ich podstawowym elementem jest tzw. zdarzenie początkowe, które rozpoczyna łańcuch niekorzystnych zdarzeń. Biorąc za przykład ostatnie spektakularne i bardzo niebezpieczne zdarzenie z cysterną przewożącą płynny LPG w Chrzanowie oraz inne udokumentowane zdarzenia, można założyć, że zdarzeniem początkowym może być uszkodzenie i strumieniowy wyciek zawartości cysterny. Spowodować to może rozwój sytuacji i kolejne rodzaje zagrożeń: pożar strumieniowy, utworzenie i wybuch chmury gazowej, ogrzanie się i rozerwanie zbiornika (BLEVE), pożar kuli ogniowej (fireball). Scenariusz rozwoju awarii może być jeszcze inny w zależności od warunków wypływu i lokalnych warunków meteorologicznych i topograficznych.

Do skutecznego działania służb ratowniczych niezbędna jest wiedza o prawdopodobnym czasie zniszczenia instalacji/zbiornika w wyniku oddziaływania pożaru

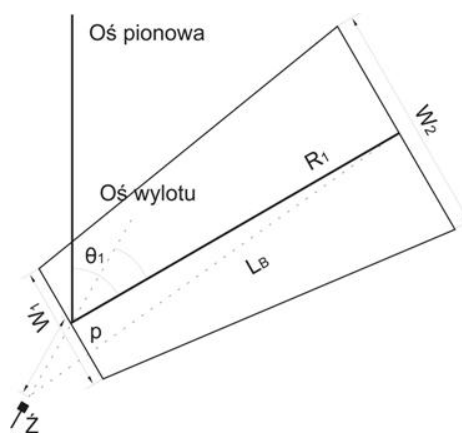
strumieniowego lub czasie wypalenia palnego medium. Pożar strumieniowy jest statystycznie najczęstszą przyczyną wtórnego wybuchu zbiorników zawierających palne skroplone gazy.

Wyciek fazy gazowej może się zmienić, po zaistnieniu predyktorów, w inne rodzaje zagrożeń. Najczęstszym będzie pożar strumieniowy, ale również wybuch BLEVE, fireball, pożar flashfire, wybuch UVCE czy odłamkowanie.

### Teoretyczne podstawy zagadnienia

W dostępnej literaturze trudno doszukać się opisu wyników badań dotyczących oddziaływania promieniowania cieplnego na płaszczyznę zbiornika podczas pożaru strumieniowego przy awaryjnym uwalnianiu się gazu propan-butan (LPG) oraz parametrów termodynamicznych ( $p$ ,  $V$ ,  $T$ ,  $Q$ ) przemian międzyfazowych wewnątrz zbiornika. Powstanie pożaru strumieniowego i jego wpływ na płaszczyznę zbiornika i jego zawartość w istotny sposób wpływa na bezpieczeństwo otoczenia oraz prowadzenie akcji ratowniczo-gaśniczej. Ekspozycja zbiornika na promieniowanie powoduje niekorzystne przemiany termodynamiczne wewnątrz zbiornika. Pozostający w zbiorniku gaz może podnosić swoją temperaturę z jednoczesnym wzrostem ciśnienia wewnątrz. Przemiany te mają miejsce w trakcie wycieku fazy gazowej, ciekłej lub jednocześnie ciekłej i gazowej znajdującej się wewnątrz. W zależności od miejsca rozszczelnienia, rodzaju wycieku, właściwości fizykochemicznych substancji w środku zbiornika oraz wnikania i przewodzenia ciepła następuje z różną szybkością zmiana parametrów termodynamicznych układu. Powoduje to zmiany (wzrost) parametrów wycieku gazu i bezpośrednio wielkości pożaru strumieniowego.

Do opisu pożaru strumieniowego można założyć, iż przyjmuje kształt ściętego stożka.



Ryc. 1. Model do obliczania powierzchni promieniowania dla pożaru typu jetfire [1].

W przypadku, gdy mamy do czynienia ze strumieniem gazu o początkowej gęstości ( $\rho_v$ ) oraz średnicy po rozprężeniu ( $D_j$ ), możliwa jest do określenia skuteczna średnica źródła [1, 2]:

$$D_s = D_j \left( \frac{\rho_v}{\rho_0} \right)^{0,5} \quad (1)$$

gdzie:

$D_s$  – skuteczna średnica źródła [m],

$D_j$  – średnica po rozprężeniu [m],

$\rho_v$  – gęstość początkowa gazu [ $\text{kg/m}^3$ ],

$\rho_0$  – gęstość gazu w warunkach normalnych [ $\text{kg/m}^3$ ].

W celu określenia długości płomienia  $L_0$ , po wypływie ze zbiornika (pomijając warunki atmosferyczne) można skorzystać z poniższego równania [1, 2]:

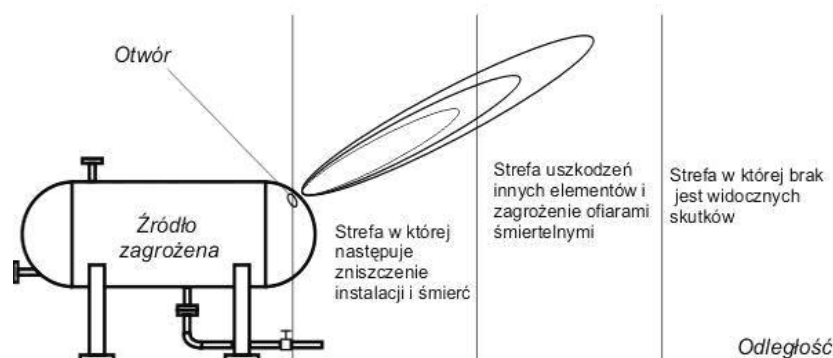
$$\left( \frac{2,85D_s}{L_0 W} \right) = 0,2 + 0,024 \left( \frac{g}{D_s^2 u_j^2} \right)^{0,5} L_0 \quad (2)$$

gdzie:

$L_0$  – długość promienia [m],

$u_j$  – prędkość wypływu gazu [ $\text{ms}^{-2}$ ].

Wyznaczając długość płomienia  $L$  jesteśmy w stanie określić strefę zagrożeń dla ludzi i instalacji, zlokalizowanych wokół uformowanego płomienia. Przedstawiony poniżej rysunek ukazuje skutki w poszczególnych strefach.



Ryc. 2. Strefy awarii i uszkodzeń dla pożaru jetfire.

Wpływ na wielkość i wysokość płomienia ma wartość emisji gazu, zależna od parametrów magazynowania medium w zbiorniku oraz parametrów wypływu.

Wyciek gazu przez otwór jest bardzo dobrze opisany przez znane prawo Bernoulliego:

$$Q_g = c_o A_h \left[ p \cdot \rho_o \cdot \gamma \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}} \right]^{\frac{1}{2}} \text{ - wyciek gazu dławiony} \quad (3)$$

$$Q_c = c_o A_h \cdot \rho_c \left[ 2 \left( \frac{p - p_a}{\rho_c} \right) + 2g \cdot H_c \right]^{\frac{1}{2}} \text{ - wyciek fazy ciekłej} \quad (4)$$

gdzie:

$Q_g$  – natężenie emisji gazu z otworu, zależne od czasu [kg/s],

$c_o$  – współczynnik emisji dla otworu, zależny od kształtu otworu, lepkości gazu, liczby Reynoldsa; dla gazu 1, cieczi 0,64 [bezwymiarowy],

$A_h$  – powierzchnia otworu [m<sup>2</sup>],

$H_c$  – wysokość fazy ciekłej [m],

$\rho_o$  – gęstość gazu w zbiorniku [kg/m<sup>3</sup>],

$\rho_c$  – gęstość cieczy w zbiorniku [kg/m<sup>3</sup>],

$\gamma$  – stosunek pojemności cieplnych gazu [bezwymiarowy],

$p_a$  – ciśnienie atmosferyczne [Nm<sup>-2</sup>],

$p$  – ciśnienie gazu w zbiorniku [Nm<sup>-2</sup>],

$R$  – stała gazowa (8,314 [J/mol·K]),

$g$  – przyspieszenie ziemskie (9,81 [ms<sup>-1</sup>]),

$T$  – temperatura gazu w zbiorniku [K],

$M$  – masa molowa gazu [kg/mol].

Ciśnienie w zbiorniku zależne od temperatury wpływa znacząco na wartość emisji gazu wydostającego się przez otwór. Temperatura medium zaś zależy od ilości ciepła dostarczonego do zbiornika.

Przewodzenie ciepła przez ścianki znajdziemy w literaturze przedmiotu w postaci prawa Fourier'a:

$$\vec{q} = -\lambda \text{grad}T = -\lambda \nabla T \quad (5)$$

gdzie:

$T$  – temperatura [K],

$\lambda$  - współczynnik przewodzenia ciepła [W/m<sup>2</sup>/K]

$q$  – moc strumienia ciepła [W/m<sup>2</sup>].

Wykorzystanie pojedynczych praw do opisu złożonych procesów niesie ze sobą znaczne uproszczenia i błędy. Szybkość zmian fazowych towarzyszących wyciekowi skroplonych gazów zależne są od ilości ciepła pobranego z otoczenia, niezbędnego do zmiany stanu skupienia z ciekłego na gazowy. Obecne modele wypływu nie uwzględniają procesów cieplnych towarzyszących wyciekowi.

Trudno jest natomiast doszukać się w literaturze całościowego opisu zjawiska jetfire i jego następstw uwzględniającego nie tylko strumień ciepła oddawany i zagrożenia miejscowe, ale ogrzewanie zbiornika, uwzględnienie bilansu cieplnego pomiędzy otoczeniem, płomieniem i zbiornikiem, wypływ gazu przez otwór.

### **Zakończenie**

Odpowiednie reagowanie na zastałą sytuację wymaga od służb ratowniczych znajomości mechanizmów przebiegu awarii oraz w konsekwencji procedur postępowania awaryjnego. Wiedza o rodzaju awarii, przebiegu procesów termodynamicznych, fizycznych i innych występujących podczas zdarzenia są podstawą do wypracowania właściwych decyzji i przyjęcia dobrych strategii i technologii ratowniczych. Wymaga to jednak rozwiązania problemów badawczych:

- jakie są ilościowe parametry oddziaływania promieniowania cieplnego od pożaru na płaszcz zbiornika?
- jak zmieniają się parametry termodynamiczne LPG wewnątrz zbiornika podczas ekspozycji cieplnej?
- czy i w jaki sposób chłodzenie płaszcza zbiornika przemiany termodynamiczne i intensywność wypływu?
- czy i jak wielkość otworu wpływa na generowane zagrożenie?
- czy i w jaki sposób pojemność zbiornika decyduje o parametrach pożaru strumieniowego?

Poznanie odpowiedzi na powyższe pytania mogą być bardzo pomocne do opracowania skutecznych procedur postępowania podczas zdarzeń z awaryjnym uwolnieniem LPG przez Państwową Straż Pożarną i inne służby ratownicze. Jednak wymaga to prowadzenia kompleksowych prac badawczych na stanowiskach badawczych różnorodnie skonfigurowanych, zbliżonych do warunków rzeczywistej awarii.

## Literatura

1. Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires and BLEVEs – Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, New York 1994;
2. Pofit-Szczepańska M., *Wybrane zagadnienia fizykochemii spalania*, SGSP, 1996;
3. Dąbrowski E., *Paliwo alternatywne*. Przegląd Pożarniczy nr 4, 1993;
4. Birk A. M., Cunningham M. H., *A medium scale experimental study of the boiling liquid expanding vapour explosion (BLEVE)*, Transport Canada Report TP 11995E, 1994;
5. Hildebrand M., Noll G., *Gasoline tank truck emergencies*, Guidelines & Procedures, 2nd Ed., IFSTA, 1996;
6. Hildebrand M., Noll G., Donahue M., *Storage tank emergencies*, Fire Protection Publications, 1997;
7. Werner Ch., *Standard operating procedures*, Hazardous Materials Incidents, LPG Emergencies, VA Fire Department, 1994;
8. Fewtrell P., Hrist L., *A review of high - cost chemical/petrochemical accidents since 1974*, Loss Prevention Bulletin, 140, Institution Of Chemical Engineers, April 1998, pp. 3-9.