

Zdzisław SALAMONOWICZ¹
Wojciech JAROSZ²
Rafał MATUSZKIEWICZ²
Łukasz OSIĄK²

MODELOWANIE TRANSPORTU MASY I CIEPŁA PODCZAS WYPLÝWU STRUMIENIOWEGO GAZU ZE ZBIORNIKA ZAWIERAJĄCEGO FAZĘ SKROPLONĄ

Artykuł podejmuje temat analizy parametrów termodynamicznych układu propan-zbiornik-otoczenie, podczas awaryjnego uwolnienia fazy gazowej ze zbiornika zawierającego skroplony gaz. W pracy zaproponowano model opisujący procesy zachodzące podczas emisji gazu ze zbiornika z fazą skroploną, uwzględniający bilans ciepła i masy badanego układu. Wyniki przedstawionego modelu uzyskano przy wykorzystaniu programu Matlab. Analizowany model opisuje następujące parametry: temperaturę fazy ciekłej i fazy parowej propanu, temperaturę zbiornika w części fazy ciekłej i parowej, ubytek masy fazy parowej oraz przejście międzyfazowe ciecz-para. Weryfikacji modelu dokonano poprzez serię badań przedmiotowego układu. Wykorzystano standardowe butle o pojemności wodnej 27 dm³ zawierające 10 kg propanu. Uzyskano dobrą zgodność modelu z danymi eksperymentalnymi.

Słowa kluczowe: emisja, wrzenie, awaryjne uwolnienie, propan

1. Wstęp

Proces magazynowania i transportu gazów skroplonych w zbiornikach ciśnieniowych, z punktu widzenia bezpieczeństwa procesowego, wymaga opracowania scenariuszy awaryjnych i analizy ryzyka. Zbiorniki magazynujące skroplone medium pod ciśnieniem znaleźć można zarówno w przemyśle rafineryjnym, energetycznym jak i transporcie. Szczególnym sposobem wykorzystania, jako alternatywy dla gazu ziemnego, jest użycie propanu-butanu w przydomowych zbiornikach i przenośnych butlach.

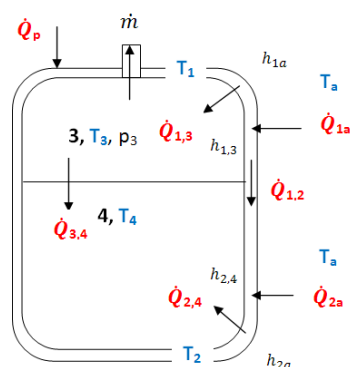
¹ Autor do korespondencji: Zdzisław Salamonowicz, Szkoła Główna Służby Pożarniczej, ul. Słowackiego 52/54, 01-629 Warszawa, 225617546, zsalamonowicz@sgsp.edu.pl.

² Szkoła Główna Służby Pożarniczej, ul. Słowackiego 52/54, 01-629 Warszawa.

Analiza zjawisk zachodzących podczas otwarcia zaworu bezpieczeństwa w zbiorniku zawierającym skroplone medium, zajmuje wielu badaczy i stanowi skomplikowane zagadnienie wymagające uwzględnienia wielu zmiennych. Podczas gwałtownego otwarcia zaworu bezpieczeństwa lub uszkodzenia zbiornika w górnej części następuje emisja fazy parowej z jednoczesnym rozpoczęciem wrzenia cieczy. Ze względu na niską temperaturę wrzenia proces ten może przebiegać bardzo intensywnie, nawet z emisją dwufazową [3]. Modelowanie emisji fazy parowej ze zbiornika opiera się na bilansie masy i energii układu ciecz-para - zbiornik - otoczenie. Najistotniejsze zagadnienia dotyczą wymiany ciepła z otoczeniem podczas których zachodzi wykraplanie pary wodnej z zamarzaniem oraz wymiany masy związanej z procesem wrzenia i emisją przez otwór.

2. Modelowanie

Zaproponowany model wypływu strumieniowego propanu ze zbiornika przedstawia zmiany parametrów termodynamicznych zachodzące podczas awaryjnego uwolnienia. Zaproponowany model pozwala zasymulować zmianę następujących parametrów układu: temperaturę fazy gazowej, temperaturę fazy ciekłej, temperaturę górnej powłoki zbiornika (będącej w kontakcie z fazą gazową), temperaturę dolnej powłoki zbiornika (będącej w kontakcie z fazą ciekłą), masę fazy gazowej i masę fazy ciekłej. Model analizuje zmianę ww. parametrów podczas wypływu strumieniowego i natychmiastowego zapłonu. Izenotropowo-adiabaticzny wypływ odbywa się przez otwór o określonej średnicy. Algorytm w zależności od ciśnienia panującego w zbiorniku uwzględnia wypływ dławiony lub niedławiony. Obliczenia numeryczne zostały wykonane za pomocą środowiska obliczeń matematycznych Matlab.



Rys. 1. Układ propan-zbiornik-otoczenie
Fig. 1. Propane-tank-environment system

Warunki brzegowe:

- w początkowym stadium faza ciekła i faza gazowa znajdują się w stanie równowagi,
- układ zbiornik-otoczenie również jest w równowadze, tj. początkowe temperatury: fazy ciekłej, fazy gazowej, zbiornika (zarówno górnej jak i dolnej części) są równe temperaturze otoczenia
- temperatura otoczenia jest stała,
- przepływ strumienia ciepła przez ściany zbiornika jest traktowany jako przepływ przez nieskończoność

cienką powłokę (przy przepływie strumienia ciepła grubość zbiornika nie jest uwzględniana),

- w obliczeniach zbiornik traktowany jest jako jednorodny walec,
- płaszcz zbiornika został podzielony na dwie części wyimaginowaną linią, odzwierciedlającą kontakt dolnej i górnej części zbiornika odpowiednio z fazą ciekłą i fazą gazową propanu,
- temperatury: fazy ciekłej, fazy gazowej, dolnej i górnej części płaszcza zbiornika są stałe w całej objętości,
- współczynniki których wartości użyte w modelu traktowane są jako wartości stałe, nie uwzględniono ich zmian w zależności od parametrów termodynamicznych,
- wartości, które w modelu są traktowane jako zmienne w czasie to: współczynniki wymiany ciepła, strumienie masowe: wypływu i odparowania, gęstości fazy ciekłej i gazowej, wysokości obu faz, powierzchnie wymiany ciepła, strumień ciepła z otoczenia, strumień ciepła dostarczany od pożaru, strumień ciepła odparowania fazy ciekłej, strumień ciepła odprowadzanego do otoczenia z fazy gazowej, ciśnienie panujące w zbiorniku.

Analiza zmian parametrów w czasie odbywa się poprzez rozwiązanie poniższego układu:

$$\begin{cases} Q_1 = \dot{Q}_{1a}t - \dot{Q}_{1,3}t - \dot{Q}_{1,2}t + \dot{Q}_{pożar}t \\ Q_2 = \dot{Q}_{2a}t + \dot{Q}_{1,2}t - \dot{Q}_{2,4}t \\ Q_3 = \dot{Q}_{1,3}t - \dot{Q}_{3,4}t - \dot{Q}_{str}t \\ Q_4 = \dot{Q}_{2,4}t + \dot{Q}_{3,4}t - \dot{Q}_{par}t \\ m_3 = m_{30} - \dot{m}_{str}t + \dot{m}_{par}t \\ m_4 = m_{40} - \dot{m}_{par}t \end{cases} \quad (1)$$

który rozpatrywany szczegółowo w czasie przyjmuje postać:

$$\begin{cases} \frac{dT_1}{dt} = \frac{h_{1a}A_{1a}(T_a - T_1)t - h_{1,3}A_{1,3}(T_1 - T_3)t - h_{st}A_{st}(T_1 - T_2)t + \dot{Q}_{pożar}t}{m_1 c_{st}} \\ \frac{dT_2}{dt} = \frac{h_{2a}A_{2a}(T_a - T_2)t + h_{st}A_{st}(T_1 - T_2)t - h_{2,4}A_{2,4}(T_2 - T_4)t}{m_2 c_{st}} \\ \frac{dT_3}{dt} = \frac{h_{1,3}A_{1,3}(T_1 - T_3)t - h_{3,4}A_{3,4}(T_3 - T_4)t - \dot{Q}_{str}t}{m_3 c_3} \\ \frac{dT_4}{dt} = \frac{h_{2,4}A_{2,4}(T_2 - T_4)t + h_{3,4}A_{3,4}(T_3 - T_4)t - \dot{Q}_{par}t}{m_4 c_4} \\ \frac{dm_3}{dt} = -\dot{m}_{str}t + \dot{m}_{par}t \\ \frac{dm_4}{dt} = -\dot{m}_{par}t \end{cases} \quad (2)$$

Masowe natężenie wypływu (m_{str}) obliczono z uwzględnieniem kryterium wypływu dławionego zgodnie ze wzorem [7]:

$$p_3 \geq p_a \left(\frac{\gamma+1}{2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (3)$$

Wypływ dławiony obliczono z równania:

$$\dot{m}_{str} = A_h p_3 \left[\frac{yM}{RT_3} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

zaś wypływ niedławiony ze wzoru:

$$\dot{m}_{str} = A_h \sqrt{2\rho_3 p_3 \left(\frac{\gamma}{\gamma-1} \right) \left[\left(\frac{p_a}{p_3} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p_a}{p_3} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]} \quad (5)$$

Strumień ciepła od pożaru strumieniowego opisany wzorem [4]:

$$\dot{Q}_{pożar} = \frac{A_{34} \eta \tau_a \dot{m}_{str} H_{sp}}{4\pi x^2} \quad (6)$$

Strumień ciepła potrzebny do odparowania cieczy wrzącej obliczono na podstawie [1]:

$$\dot{Q}_{par} = A_{34} \mu_4 h_{par} \left[\frac{(\rho_4 - \rho_3) g_z}{\sigma} \right]^{0.5} \left[\frac{C_{p4}(T_2 - T_{sat})}{C_{sf} h_{par} Pr_l^n} \right]^3 \quad (7)$$

Strumień masowy odparowania:

$$\dot{m}_{par} = \frac{\dot{Q}_{par}}{h_{par}} \quad (8)$$

Początkowe masy faz gazowej i ciekłej obliczono z układu równań:

$$\begin{cases} m_{30} + m_{40} = m_{netto} \\ \frac{m_{30}}{\rho_{30}} + \frac{m_{40}}{\rho_{40}} = \pi r^2 H_{zb} \end{cases} \quad (9)$$

Do obliczenia równowagi ciecz para wykorzystano równanie Penga-Robinsona mające postać [8]:

$$p = \frac{RT}{V-b} - \frac{a\alpha(T)}{V(V+b)+b(V-b)} \quad (10)$$

Współczynniki wymiany ciepła między otoczeniem a górną i dolną warstwą zbiornika obliczono z równań [6]:

$$h_{1a} = 1,31(T_1 - T_a)^{\frac{1}{3}} \quad (11)$$

$$h_{2a} = 1,31(T_2 - T_a)^{\frac{1}{3}} \quad (12)$$

Współczynnik wymiany ciepła pomiędzy ścianą zbiornika a fazą gazową obliczono na podstawie zależności [9]:

$$h_{13} = \frac{k_3 C R a_3^{\frac{1}{3}}}{H_g} \quad (13)$$

gdzie:

$$Ra_3 = \frac{g_z \beta_3 (T_1 - T_3) H_g^3}{\alpha_3 \nu_3} \quad (14)$$

i współczynnik objętościowej rozszerzalności cieplnej fazy gazowej:

$$\beta_3 = \frac{2}{T_1 + T_3} \quad (15)$$

Analogicznie dla współczynnika wymiany ciepła między ścianką zbiornika, a fazą ciekłą zastosowano:

$$h_{2,4} = \frac{k_4 C R a_4^{\frac{1}{3}}}{H_c} \quad (16)$$

Współczynnik wymiany ciepła wzdłuż ścianki stalowej [7]:

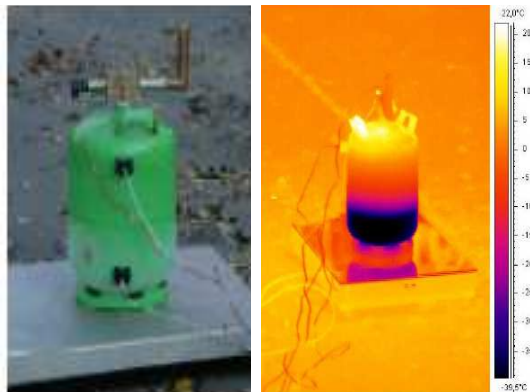
$$h_{st} = \frac{k_{st}}{\sqrt{k_{st} g \left(\frac{1}{\sqrt{h_{1a} + h_{13}}} + \frac{1}{\sqrt{h_{2a} + h_{24}}} \right)}} \quad (17)$$

Współczynnik wymiany ciepła między fazą ciekłą a gazową obliczono z zależności pomiędzy liczbą Nusselta, Jakoba i Prandtla [7]:

$$h_{3,4} = \frac{k_4 \cdot Ja^2}{d \cdot C_{mb}^3 \cdot Pr^l} \quad (18)$$

3. Badania doświadczalne

Do badań wykorzystano standardowe butle o pojemności wodnej 27 dm³ zawierające 10 kg propanu. W celu wprowadzenia termopar i czujnika ciśnienia do wnętrza butli, zaprojektowano i wykonano głowicę z zaworem oraz wejściami na elementy pomiarowe. W trakcie eksperymentów dokonano rejestracji temperatur fazy ciekłej, parowej, temperatur zewnętrznej części powłoki zbiornika odpowiadającej fazie ciekłej i parowej, ciśnienia w zbiorniku, masę układu oraz temperaturę zewnętrzną. Rysunek 2 przedstawia stanowisko badawcze w zakresie promieniowania widzialnego i podczerwieni.



Rys. 2. Stanowisko badawcze – obraz VIS (po lewej) i IR (po prawej)

Fig. 2. Test stand – view in VIS (left) and IR (right)

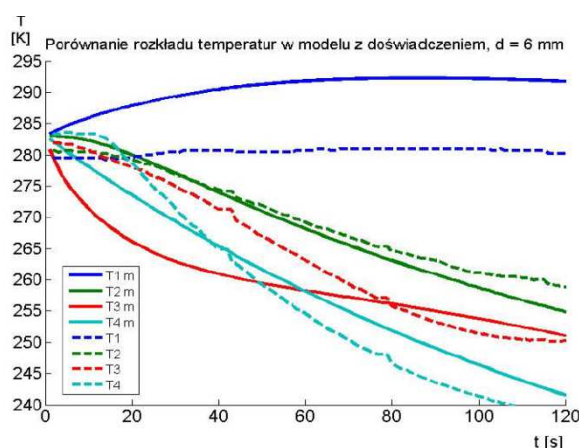
4. Wyniki i dyskusja

Podczas wypływu strumieniowego fazy gazowej z układu, który znajdował się w równowadze, następuje spadek ciśnienia w zbiorniku. Przy niższym ciśnieniu niższa jest również temperatura nasycenia, zatem w wyniku spadku ciśnienia ciecz znajduje się w temperaturze wyższej od temperatury nasycenia i zaczyna wrzeć. Intensywność wrzenia jest proporcjonalna do różnicy między temperaturą fazy ciekłej, a temperaturą nasycenia przy określonym ciśnieniu. Faza ciekła ulegająca odparowaniu pobiera ciepło z układu. Ciepło pobierane przez układ z otoczenia jest mniejsze od ciepła potrzebnego do odparowania fazy ciekłej. Dlatego podczas wypływu strumieniowego można zaobserwować spadek temperatur obu faz oraz obu części zbiornika. Na rysunkach 3-6 przedstawiono porównania zmian poszczególnych temperatur otrzymane z zaproponowanego modelu oraz danymi doświadczalnymi. Wyniki przedstawiono dla czterech średnic otworu 6, 5, 4 i 2 mm.

Zgodnie z powyższymi wynikami podczas pożaru strumieniowego wzrasta jedynie temperatura górnej części zbiornika (T_1). Jest to wynikiem promieniowania cieplnego płomienia (o wartości strumienia początkowego <750 W) tylko na tą część zbiornika, podczas wypływu skierowanego pionowo do góry. Najniższe wartości uzyskiwane są dla temperatury fazy ciekłej (T_4), a zatem ciepło potrzebne do odparowania fazy ciekłej jest wysokie. Temperatura dolnej części zbiornika (T_2) zmniejsza się w podobny sposób do temperatury fazy ciekłej. Spadek T_2 jest nieco mniejszy niż T_4 . Faza ciekła pobiera duże ilości ciepła od dolnej części powłoki zbiornika. Nieco odmiennym przebiegiem charakteryzuje się temperatura fazy gazowej (T_3). Początkowo jej spadek jest gwałtowniejszy niż w przypadku fazy ciekłej, po czym staje się łagodniejszy i ostatecznie temperatura fazy ciekłej jest znacznie niższa. Gwałtowny spadek w początkowej

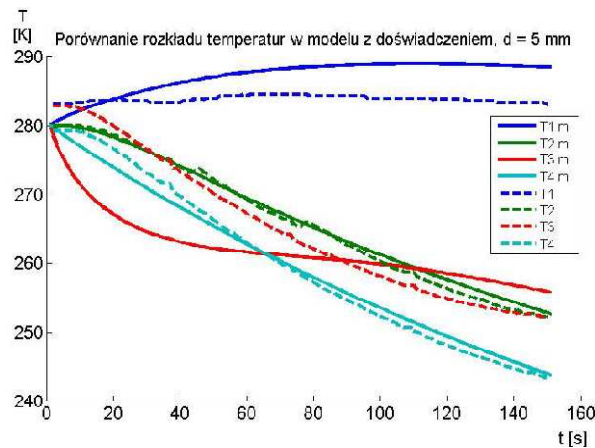
fazie jest wynikiem odprowadzania dużej ilości ciepła z fazy gazowej do otoczenia. W miarę upływu czasu spada ciśnienie w zbiorniku, w związku z czym strumień i prędkość wypływu również ulegają zmniejszeniu.

Badania temperatur przeprowadzone podczas pożaru strumieniowego dla wypływu przez średnicę 6 mm i przy temperaturze otoczenia ok. 280-285K potwierdzają tendencje zmian temperatur otrzymane w modelu. W przypadku temperatury górnej części zbiornika (T_1) odnotowano wzrost o ok. 10 K, czego nie potwierdzają badania eksperymentalne. Różnica wynika z faktu, iż do obliczeń przyjęto, że płomień podczas spalania jest stabilny, jego kształt nie zmienia się oraz pominięto wpływ wiatru. Temperatura dolnej części zbiornika (T_2) otrzymana w wyniku symulacji jest bardzo zbliżona do temperatury zmierzonej w rzeczywistości. Modelowa temperatura fazy ciekłej (T_4) zachowuje zbliżony trend do temperatury fazy ciekłej podczas próby doświadczalnej. Temperatura T_4 uzyskana z modelu charakteryzuje się stałym spadkiem w czasie, natomiast w rzeczywistości spadek temperatury T_4 w pierwszej minucie jest znacznie wyraźniejszy niż w dalszym czasie eksperymentu. W przypadku temperatury fazy gazowej (T_3) osiągnięto również zbieżność w wynikach symulacji i rzeczywistych, jednak w początkowej fazie widoczna jest różnica w przebiegu tych temperatur. Analizę obliczeń w modelu przyjęto dla czasu symulacji 120 s. W modelu ujęte jest jedynie wrzenie pęcherzykowe, nie uwzględniono wrzenia błonkowego. Podczas wrzenia błonkowego znacząco zmniejsza się strumień ciepła parowania. Stąd też po osiągnięciu odpowiedniej różnicy pomiędzy temperaturą cieczy, a temperaturą nasycenia następuje spowolnienie spadku temperatury fazy ciekłej i w konsekwencji pozostałych temperatur, a nawet wzrost temperatury fazy gazowej.



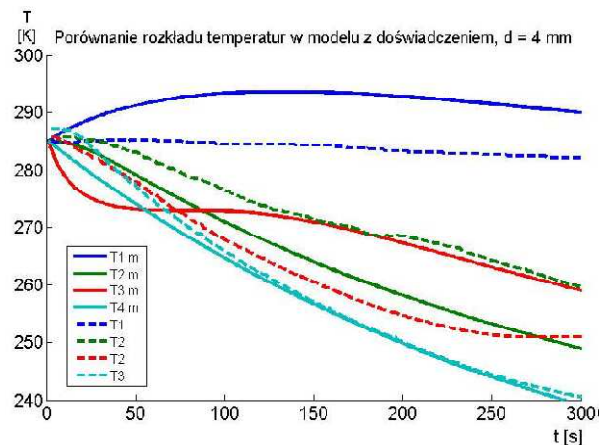
Rys. 3. Porównanie zmian temperatur modelu z wynikami doświadczalnymi dla średnicy otworu $d = 6$ mm

Fig. 3. Comparison of temperature changes between the model and experimental data for a hole diameter $d = 6$ mm



Rys. 4. Porównanie zmian temperatur modelu z wynikami doświadczalnymi dla średnicy otworu $d = 5$ mm

Fig. 4. Comparison of temperature changes between the model and experimental data for a hole diameter $d = 5$ mm



Rys. 5. Porównanie zmian temperatur modelu z wynikami doświadczalnymi dla średnicy otworu $d = 4$ mm

Fig. 5. Comparison of temperature changes between the model and experimental data for a hole diameter $d = 4$ mm

Badania temperatur dla wypływu przez średnicę 5 mm i przy temperaturze otoczenia ok. 280-285K również potwierdzają tendencje zmian temperatur otrzymane w modelu. Dla tej próby wyniki uzyskane z modelu są jeszcze bardziej zbliżone do wyników empirycznych. Temperatury fazy ciekłej (T_4) i górnej części zbiornika (T_2) są niemal identyczne w całym czasie symulacji. Temperatura fazy gazowej (T_3) uzyskana w wyniku symulacji chwilowo znacznie

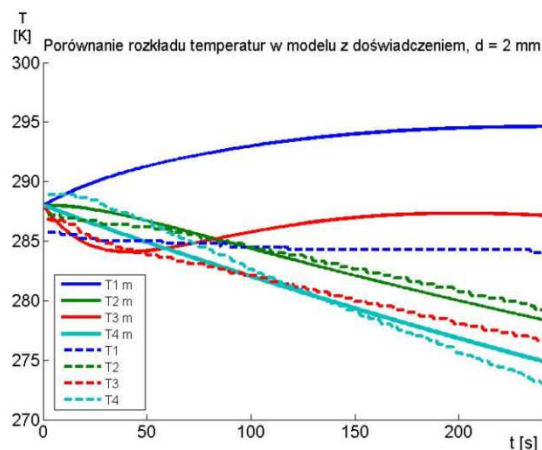
odbiega od wartości faktycznie zmierzonych, jednak należy zwrócić uwagę, iż ogólna tendencja pozostaje zachowana, a także wartości temperatur w końcowej fazie symulacji są zbliżone. Modelowa temperatura górnej części zbiornika (T_1) podobnie jak na rysunku 3 również charakteryzują się wzrostową tendencją, z kolei temperatura T_1 podczas eksperymentu pozostaje raczej niezmienną.

Porównując wyniki uzyskane przy pomocy środowiska do obliczeń matematycznych Matlab z wynikami doświadczalnymi dla wypływu strumieniowego przez otwór o średnicy 4 mm można zauważyć, że temperatury fazy ciekłej (T_4) w obu przypadkach są bardzo podobne w całym czasie symulacji. Uwagę zwraca natomiast temperatura dolnej części zbiornika (T_2), której spadek podczas eksperymentu jest wyraźnie wolniejszy niż wynika to z obliczeń. Wyjaśnienia można szukać we wpływie czynników zewnętrznych, np. wilgotności powietrza czy prędkości wiatru. Porównanie temperatury górnej części zbiornika (T_1) nie odbiega od poprzednich przypadków. W wyniku obliczeń uzyskano wyższą temperaturę. Z kolei w przypadku temperatury fazy gazowej (T_3) różnice pomiędzy obliczeniami, a wynikami rzeczywistymi są bardziej wyraźne.

W przypadku wypływu przez otwór o średnicy 2 mm ponownie można zaobserwować, iż temperatura fazy ciekłej (T_4) i temperatura dolnej części zbiornika (T_2) uzyskana podczas symulacji jest bardzo podobna do wyników rzeczywistych. Natomiast duża różnica została odnotowana dla temperatury fazy gazowej (T_3) i temperatury górnej części zbiornika (T_1). Obliczeniowa temperatura T_1 w końcowej fazie jest wyższa o ok. 10 K od temperatury rzeczywistej, co stanowi dużą różnicę, jednak porównywalną z poprzednimi wynikami. Wprawdzie temperatura fazy gazowej (T_3) otrzymana w wyniku symulacji przekracza temperaturę T_3 uzyskaną podczas eksperymentu również o ok. 10 K, jednak jest to bardzo duża różnica w porównaniu z wynikami dla większych średnic. W przypadku wypływu przez otwór o średnicy 2 mm strumień wypływu był znacznie mniejszy niż w poprzednich próbach, a w związku z tym strumień odparowania był również mniejszy, wskutek czego mniej ciepła było pobierane na odparowanie cieczy. W praktyce temperatury T_4 i T_2 spadały wolniej niż w poprzednich przypadkach. Dodając do tego znaczny wzrost temperatury T_1 w wyniku symulacji otrzymano nadmierny wzrost temperatury T_3 w porównaniu z rzeczywistymi wynikami.

Wyniki zmiany temperatury fazy ciekłej (T_4) otrzymane w modelu są bardzo zbliżone do danych doświadczalnych. W eksperymencie w pierwszych sekundach temperatura utrzymuje się na stałym poziomie po czym w początkowej fazie spadek jest bardziej gwałtowny, a w końcowej łagodniejszy. Podobnie wygląda sytuacja temperatury dolnej części zbiornika (T_2). W przypadku temperatury fazy gazowej (T_3) wyniki różnią się nieco wyraźniej. Co prawda zachowana jest tendencja spadkowa i w końcowej fazie różnica temperatur jest nieznaczna, jednak w początkowej fazie w modelu następuje dużo szybszy spadek temperatury, natomiast w części końcowej nieco wolniejszy. W przypadku

temperatury górnej części zbiornika (T_1) różnica między modelem, a eksperymentem jest najbardziej widoczna. W modelu następuje wzrost temperatury o niespełna 10 K, natomiast w doświadczeniu temperatura jest raczej stała. W modelu założono, że płomień jest stabilny o niezmiennym kształcie i nie uwzględniono prędkości wiatru. W rzeczywistości strumień ciepła pochodzący od pożaru był mniejszy od przyjętego w modelu.



Rys. 6. Porównanie zmian temperatur modelu z wynikami doświadczalnymi dla średnicy otworu $d = 2$ mm

Fig. 6. Comparison of temperature changes between the model and experimental data for a hole diameter $d = 2$ mm

5. Podsumowanie i wnioski

Biorąc pod uwagę uzyskane wyniki symulacji obliczeniowych oraz porównując je z wynikami badań eksperymentalnych w pierwszej kolejności nasuwa się wniosek dotyczący przebiegu temperatur podczas wypływu strumieniowego bez zapłonu. Przy takich warunkach następuje spadek wszystkich analizowanych temperatur, tj.: fazy ciekłej, fazy gazowej, górnej części płaszcza zbiornika i dolnej części płaszcza zbiornika. Największemu obniżeniu ulega temperatura fazy ciekłej, z kolei najmniejszemu temperatura górnej części zbiornika. Spadek temperatury fazy ciekłej wynika z dużej ilości ciepła niezbędnej do odparowania fazy ciekłej. W związku z tym znacznemu spadkowi ulegają również temperatura dolnej części zbiornika i temperatura fazy gazowej. W miarę upływu czasu zmniejsza się strumień odparowania, zarazem mniejsza ilość ciepła jest pobierana na odparowanie fazy ciekłej, w konsekwencji temperatura fazy ciekłej oraz dolnej części zbiornika ulegają stabilizacji, a temperatura fazy gazowej zaczyna nawet nieznacznie rosnąć. W związku z tym, ciepło potrzebne do odparowania wywiera największy wpływ na rozkład temperatur w układzie. Obser-

wując zjawisko pożaru strumieniowego odnosi się wrażenie, że sytuacja w porównaniu z wypływem bez zapłonu powinna ulec diametralnej zmianie. W praktyce okazuje się, że wcale tak nie jest. Temperatura fazy ciekłej, temperatura fazy gazowej oraz temperatura dolnej części zbiornika w dalszym ciągu obniżają się. Jedynie temperatura górnej części zbiornika pozostaje mniej więcej na stałym poziomie, ale też nie rośnie. Promieniowanie cieplne pochodzące od płomienia wpływa jedynie nieznacznie na temperaturę górnej części zbiornika i temperaturę fazy gazowej.

Zaproponowany model wypływu strumieniowego wyjaśnia zjawiska zachodzące podczas pożaru strumieniowego poprzez zastosowanie zasad termodynamiki i wykorzystanie zależności równań kryterialnych. Zgodnie z wynikami otrzymanymi w wyniku symulacji przeprowadzonych w środowisku obliczeniowym Matlab, podczas wypływu strumieniowego największemu spadkowi ulega temperatura fazy ciekłej. Nieco mniejszy spadek odnotowywany jest w przypadku temperatury dolnej części zbiornika i temperatury fazy gazowej. Temperatura górnej części zbiornika zmniejsza się w najmniejszym stopniu. Podczas pożaru strumieniowego przebieg zmian temperatury fazy ciekłej i temperatury dolnej części zbiornika pozostaje praktycznie niezmienny. Obniżanie się temperatury fazy gazowej ma nieco wolniejszy charakter, natomiast temperatura górnej części zbiornika nieznacznie wzrasta, co odbiega w pewnym stopniu od wyników doświadczalnych. Wzrost temperatury górnej części zbiornika jest wynikiem przyjętych założeń odnośnie stabilności i jednakowego kształtu płomienia w całym czasie symulacji oraz pominięciu wpływu warunków atmosferycznych. Po wykonaniu serii symulacji dla pożarów strumieniowych przy wypływie przez otwór o różnej średnicy można stwierdzić, że wraz ze wzrostem średnicy zmiany temperatur zachodzą gwałtowniej tzn. ulegają większemu obniżeniu w czasie. Najbardziej widoczna różnica występuje przy porównywaniu temperatury fazy ciekłej natomiast najmniejsze różnice są zauważalne w przypadku temperatury górnej części zbiornika. Wpływ temperatury otoczenia na szybkość zmian temperatur jest niewielki, należy jednak pamiętać, że przy założeniu, iż układ znajduje się w równowadze początkowe temperatury poszczególnych faz oraz części zbiornika są wyższe. Zaproponowany model obliczeniowy pozwala na symulację różnych warunków pożarowych.

Podsumowując wyniki uzyskane przy pomocy symulacji z próbami doświadczalnymi stwierdzono, że tendencje dotyczące zmian temperatury odpowiednich faz i części zbiornika oraz ubytku masy są prawidłowe. Ponadto przebiegi zmian obliczeniowych temperatur: fazy ciekłej i dolnej części zbiornika są bardzo zbliżone do wyników rzeczywistych. Pewne różnice można dostrzec w przebiegu temperatury fazy gazowej, natomiast temperatura górnej części zbiornika w każdym przypadku jest większa podczas symulacji. Różnica ta wynika z założeń dotyczących płomienia, zgodnie z którymi przyjęto, że płomień jest stabilny i jego kształt jest niezmienny w czasie. Nie uwzględniono

również wpływu warunków atmosferycznych, szczególnie prędkości wiatru. Założenia te mają również wpływ na przebieg zmian temperatury fazy gazowej.

Literatura

- [1] Cengel Y.A.: Heat and Mass Transfer, McGraw Hill, 2006.
- [2] Clewell H.: A simple method for estimating the source strength of spills of toxic liquids, Energy Systems Laboratory, ESL-TR-83-03, 1983.
- [3] Cumber P.: Modelling top venting vessels undergoing level swell, Journal of Hazardous Materials, A89 (2002) 109-125.
- [4] Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires and BLEVE's, American Institute of Chemical Engineers, 1994.
- [5] Holman J.P.: Heat transfer, McGraw Hill, 1992.
- [6] Incropera, DeWitt, Bergman, Lavine, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Wiley, 2006.
- [7] Mills A.F.: Heat Transfer, Prentice Hall, 1998.
- [8] Perry R.H., Green D.W.: Perry's Chemical Engineers' Handbook, The McGraw-Hill Companies, 1999.
- [9] Ramskill P.K.: The development of ENGULF to model a multi-component liquid in a fire engulfed tank, UKAEA Safety and Reliability Directorate, 1987.

MODELING OF HEAT AND MASS TRANSFER DURING GAS-PHASE JET RELEASE FROM THE TANK CONTAINING LIQUEFIED GAS

Summary

The research described in the article deals with the analysis of the thermodynamic parameters of the propane-tank-environment system during the accidental release of gaseous phase from a tank containing liquefied gas. The paper proposes a model describing the processes taking place during the emission of gas from the tank containing condensed phase, taking into account the heat and mass balance of the test system. The results of presented model were obtained using Matlab. The analyzed model describes the following parameters: temperature of the liquid phase and vapor propane phase, the tank temperature in the liquid and vapor phases, weight loss of vapour phase, and the liquid-vapor interfacial transition. Verification of the model was made through a series of tests of the system. A typical container for LPG, containing 10 kg of mixture of propane (27 dm³ volume) is used. A good agreement of the model with experimental data was obtained.

Keywords: emission, boiling, emergency release, propane

DOI: 10.7862/rm.2014.49

Otrzymano/received: 25.05.2014

Zaakceptowano/accepted: 28.06.2014