



Analiza zachowania się zbiornika ciśnieniowego po nagłym pęknięciu

AUTOR: Janusz Wach^{a,*}

^aZakład Inżynierii i Technologii Energetycznych, Instytut I-20, Politechnika Wrocławska

*Adres do korespondencji: wach@pwr.edu.pl, tel. 71 320 37 63

STRESZCZENIE

Motywacją analizy jest zagadnienie bezpieczeństwa związane z funkcjonowaniem reaktora termojądrowego ITER, gdzie elementem infrastruktury są zbiorniki ciśnieniowe o objętości 100 m³ i 330 m³, w których składowany jest azot i hel pod ciśnieniem odpowiednio 40 i 25 bar. Analiza związana jest zachowaniem się zbiornika po nagłym otwarciu spowodowanym przyczynami losowymi jak np. trzęsienie ziemi i dotyczy oszacowania energii i siły odrzutu. Jednym z celów tej analizy było określenie warunków do przeprowadzenia eksperymentu w małej skali, do określenia wielkości strefy zagrożonej wysokim ciśnieniem mogącym być przyczyną poważnych uszkodzeń ciała np. słuchu lub rozerwania płuc.

SŁOWA KLUCZOWE: *wybuch fizyczny, analiza bezpieczeństwa*

1. WPROWADZENIE

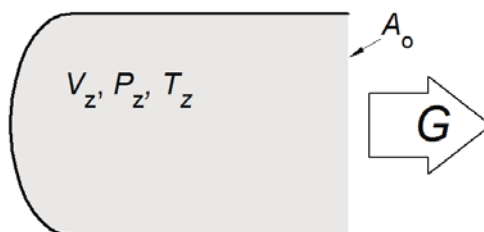
Zbiorniki ciśnieniowe są stosowane w różnych gałęziach przemysłu głównie do składowania gazów. Małe zbiorniki są wystarczająco wytrzymałe a ponadto zgromadzona w nich energia nie jest na tyle duża by stanowiły one poważne zagrożenie dla bezpieczeństwa nawet w przypadku katastrof takich jak na przykład trzęsienie ziemi. Tego nie można powiedzieć o dużych zbiornikach o objętości rzędu setek metrów sześciennych, których rozerwanie może mieć poważne skutki. Przykładem jest eksperymentalny reaktor termojądrowy ITER, budowany w Cadarache we Francji siłami krajów Unii Europejskiej oraz USA, Japonii i innych, w którym duże zbiorniki gazu są elementem infrastruktury. Są to zbiorniki o objętościach 100 m³ i 330 m³, przeznaczone na składowanie dużych ilości azotu i helu pod ciśnieniem odpowiednio 40 i 25 bar. Katastrofa elektrowni jądrowej w Fukushima z roku 2011 spowodowała, że zaostorzono wymagania bezpieczeństwa związane projektowaniem instalacji nuklearnych, do których zalicza się ITER. Dlatego konieczna stała się analiza bezpieczeństwa związana ze zniszczeniem zbiorników ciśnieniowych spowodowanym trzęsieniem ziemi. Wynika to z faktu, że najważniejszy element projektu badawczego, reaktor ITER, jest posadowiony na płycie tektonicznej, która chroni go od

wstrząsów tektonicznych, natomiast ze względu na koszty inne elementy infrastruktury, do których zalicza się zbiorniki na azot i hel, są umieszczone poza nią, co naraża je na skutki trzęsienia ziemi.

Najgorszym scenariuszem, który trzeba wziąć pod uwagę jest całkowite rozerwanie się zbiorników i związany z tym wybuch fizyczny. Analiza taka [1] dotycząca określenia strefy rażenia, czyli obszaru objętego podwyższonym ciśnieniem o wartości powodującej trwale uszkodzenie ciała ($>0,35$ bar – uszkodzenie błony bębenkowej, >2 bar – rozerwanie płuc) była dokona w ITER i bazowała na modelu TNT zaproponowanego przez Paulsena [2]. Podobną analizę [3] przeprowadzono również na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym Politechniki Wrocławskiej w oparciu o model termodynamiczny, według którego rozmiar strefy zagrożenia był znacznie niższy. Konieczne więc stało się doświadczalne zweryfikowanie modeli, przez zmierzenie rozkładu ciśnienia w funkcji odległości od rozrywanego zbiornika podczas eksperymentów w małej skali. Do zaprojektowania instalacji doświadczalnej potrzebne są dane o zachowaniu się zbiornika testowego pozwalające na określenie niezbędnych środków bezpieczeństwa w tym przede wszystkim określenie ilości energii odrzutu, która ma być pochłonięta. Niniejsza praca jest elementem tej analizy, a wnioski z niej płynące mogą ponadto mieć zastosowanie do oceny zachowania się zbiorników w skali właściwej dla instalacji ITER.

2. OBLICZENIE SIŁY I ENERGII ODRZUTU ZBIORNIKA PO NAGŁYM OTWARCIU

Szkic do analizy problemu przedstawia rysunek 1. Zbiornik o objętości V_z jest napełniony gazem do ciśnienia P_z i temperatury T_z . W pewnym momencie zostaje usunięte jego dno lub w dnie powstaje otwór o polu przekroju A_o .



Rys. 1. Szkic do obliczeń siły odrzutu zbiornika po nagłym otwarciu

W następstwie tego dochodzi do wyrzucenia gazu przez otwór i zbiornik zaczyna się poruszać pod wpływem siły będącej sumą dwóch składników. Składnik pierwszy to siła wynikająca z odrzutu gazów i może być wyznaczona z bilansu pędu układu zbiornik – gaz. Drugi składnik to efekt niezrównoważenia ciśnienia w przekroju wylotowym o powierzchni A_o objawiający się powstaniem siły na powierzchni ściany znajdującej się naprzeciwko otworu. W obliczeniach nie uwzględnia się siły tarcia, jako że chodzi o określenie maksymalnej siły z jaką musi sobie poradzić konstrukcja nośna zbiornika. Przyjmując założenie, że ciśnienie wewnątrz zbiornika jest takie samo we wszystkich jego punktach, to siłę wypadkową F działającą na zbiornik podczas wyładowania gazów wylicza się ze wzoru:

$$F(t) = G \cdot w + A_0 [p(t) - P_o] \quad (1)$$

gdzie: G jest masowym strumieniem wypływu gazu, w prędkością wylotową gazu, A_0 polem przekroju otworu wylotowego oraz $p(t)$ ciśnieniem panującym wewnątrz zbiornika w funkcji czasu. Człon pierwszy reprezentuje odrzut gazów (zmianę pędu) zaś drugi działanie ciśnienia. Równanie ruchu w postaci różniczkowej ma więc postać:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{G \cdot w}{m_z} + \frac{A_0}{m_z} [p(t) - P_o] \quad (2)$$

gdzie: m_z – masa zbiornika. Zakłada się, że wypływ gazu ze zbiornika jest określony równaniami jak dla kanału (dysza Bendemanna), czyli dla stosunku ciśnień p/P_o większego od wartości krytycznej wypływ zachodzi z prędkością krytyczną zaś dla mniejszych z podkrytyczną. Zatem ostatecznie prędkość wypływu w określają równania:

$$w(p, \rho) = \begin{cases} \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} \frac{p}{\rho} \left[1 - \left(\frac{P_o}{p} \right)^{(\kappa-1)/\kappa} \right]} & \text{dla } \beta_{kr} < \frac{P_o}{p} \\ \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa+1} \frac{p}{\rho}} & \text{dla } \beta_{kr} > \frac{P_o}{p} \end{cases} \quad (3)$$

podczas gdy masowy strumień G wypływu ze zbiornika wyniesie odpowiednio:

$$G(p, \rho) = \begin{cases} A_o \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} \frac{p}{\rho} \left[\left(\frac{P_o}{p} \right)^{2/\kappa} - \left(\frac{P_o}{p} \right)^{(\kappa-1)/\kappa} \right]} & \text{dla } \beta_{kr} < \frac{P_o}{p} \\ A_o \sqrt{p \rho \kappa \left(\frac{2\kappa}{\kappa+1} \right)^{(\kappa+1)/(\kappa-1)}} & \text{dla } \beta_{kr} > \frac{P_o}{p} \end{cases} \quad (4)$$

gdzie wartość β_{kr} krytycznego stosunek ciśnień P_o/p określa równanie:

$$\beta_{kr} = \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\kappa/(\kappa-1)} \quad (5)$$

W powyższych wzorach κ jest wykładnikiem izentropy a ρ gęstością gazu w zbiorniku. Do przeprowadzenia obliczeń potrzebne są jeszcze równania opisujące zmiany gęstości ρ ciśnienia p i temperatury T w zbiorniku. Do ich wyboru potrzebne są dodatkowe założenia i są nimi: założenie, że gaz zachowuje się jak gaz doskonały, oraz że wyładowanie ma charakter adiabatyczny, co jest uzasadnione faktem, iż zjawisko trwa zaledwie dziesiątki milisekund. Ostatecznie do obliczeń wchodzi: równanie adiabaty (7) raz równanie Clapeyrona (8) i równanie bilansu masy gazu w zbiorniku (6). Postać ostatniego wynika z faktu, że zmiana gęstości jest prostym efektem ubytkiem gazu ze zbiornika z masowa szybkością wypływu G :

$$\frac{d\rho}{dt} = -\frac{G}{V_z} \quad (6)$$

$$T = T_z \left(\frac{\rho}{\rho_z} \right)^{\kappa-1} \quad (7)$$

$$p = \rho RT \quad (8)$$

W powyższych wzorach T_z oraz ρ_z są odpowiednio temperaturą i gęstością początkową w zbiorniku a R indywidualną stałą gazową. Aby obliczyć energię, jaką uzyska zbiornik po nagłym otwarciu należy wyznaczyć przebieg prędkości w czasie $v(t)$ rozwiązując układ równań (2–8).

3. NUMERYCZNE ROZWIĄZANIA UKŁADU RÓWNAŃ

W celu numerycznego rozwiązania układu (2–8) wystarczy zastosować prosty schemat różnicowy oparty na kroku całkowania Δt . Wartości obliczane w następnej chwili są oznaczane symbolem *bis* zaś w chwili bieżącej *prim*. Kompletny układ równań przedstawia się następująco:

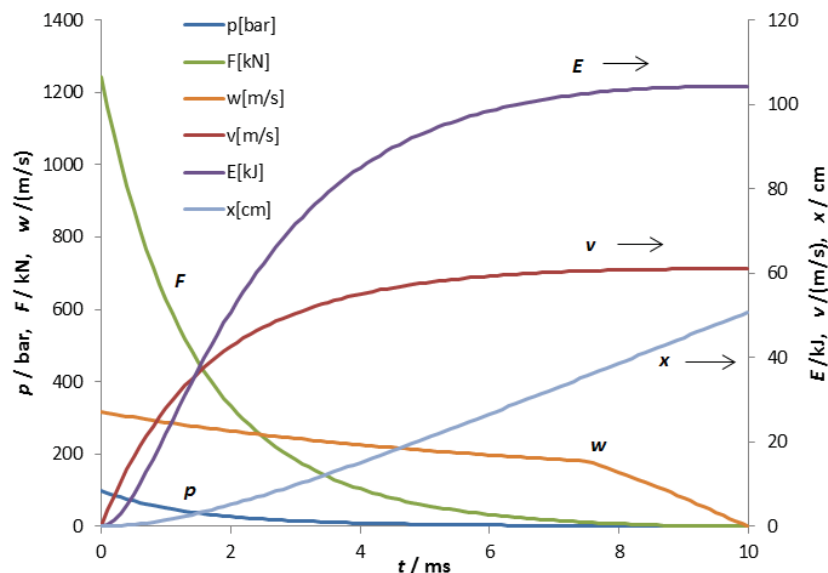
$$\begin{aligned} \rho'' &= \rho' - \frac{\Delta t}{A_o} G(p', \rho') \\ v'' &= v' + \frac{\Delta t}{m_z} [G(p', \rho') \cdot w(p', \rho') + A_o(p' - P)] \\ T'' &= T_z \left(\frac{\rho''}{\rho_z} \right)^{\kappa-1} \\ p' &= \rho'' RT' \\ x'' &= x' + \Delta t \cdot v' \end{aligned} \quad (9)$$

Tu x oznacza położenie zbiornika. Ostatnie równanie jest równaniem ruchu w oczywistej postaci $v = dx/dt$. Konieczne do uzyskania rozwiązania warunki początkowe ($t = 0$) wynoszą: $x' = 0$, $\rho' = \rho_z$, $v' = 0$, $T' = T_z$ oraz $p' = \rho_z RT$. Obliczenia są kończone z chwilą, gdy ciśnienie p w zbiorniku osiągnie wartość ciśnienia otoczenia $P_o = 10^5$ Pa.

4. WYNIKI OBLICZEŃ

Obliczenia przeprowadzono dla różnych gazów, ciśnień początkowych P_z oraz objętości zbiornika V_z . Punktem odniesienia są obliczenia dla powietrza $R = 287$ J/(kg K), $\kappa = 1,4$ oraz masy zbiornika 56 kg, objętości $V_z = 100$ L, ciśnienia $P_z = 100$ bar i temperatury $T_z = 300$ K, co odpowiada parametrom przyjętym dla zbiornika do testów wybuchu w małej skali. Energia zbiornika liczona jest, jako $m_z v^2/2$. Przebiegi zmian siły F , energii kinetycznej zbiornika E , prędkości zbiornika v , prędkości wylotowej

gazu w , zmian ciśnienia p oraz przemieszczenia zbiornika x w funkcji czasu prezentuje rysunek 2.



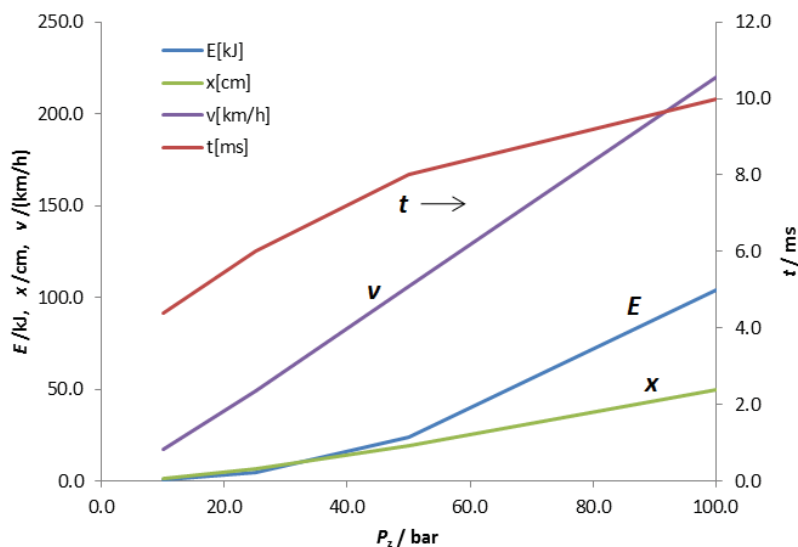
Rys. 2. Przebiegi ciśnienia gazu w zbiorniku p , siły działającej na zbiornik F , prędkości zbiornika v , prędkości wylotowej gazu w , przemieszczenia x zbiornika i jego energii E w czasie wyładowania

Wyniki obliczeń końcowej energii ruchu E , czasu wypływu ze zbiornika t_{max} , końcowej prędkości zbiornika v_k oraz drogi x_k , na której zachodzi wyładowanie dla różnych ciśnień P_z przy pozostałych parametrach bez zmian pokazuje tabela 1.

Tabela 1. Parametry ruchu dla różnych ciśnień P_z

	Ciśnienie początkowe P_z w zbiorniku w bar			
	100 bar	50 bar	25 bar	10 bar
Energia końcowa ruchu E /kJ	104	24	5	0,6
Czas wypływu t_{max} /ms	10	8	6	4,4
Prędkość zbiornika v_k /(km/h)	220	106	49	17
Przemieszczenie x /cm	50	19	7	1,5

Te same parametry w formie graficznej pokazuje wykres z rysunku 3. Jak widać prędkość końcowa v_k jaką uzyskuje zbiornik po całkowitym rozładowaniu gazu zależy linowo od ciśnienia początkowego P_z . Z obliczeń wynika też, że energia końcowa ruchu E nie zależy od przekroju wylotowego A_0 .



Rys. 3. Przebiegi parametrów ruchu w funkcji początkowego ciśnienia gazu w zbiorniku P_z

Wpływ objętości V_z zbiornika, przy zachowaniu proporcji wymiarów i proporcjonalnym przeskalowaniu jego masy m_z , oraz pozostałych parametrach jak w przypadku referencyjnym pokazuje tabela 2.

Tabela 2. Wpływ objętości V_z zbiornika na parametry ruchu

V_z / L	50	40	25	12,5
D_w / mm	400	300	200	100
m_z / kg	56	46	28	14
E / kJ	104	81	52	26
t_{max} / ms	10	14	19	40
x / cm	50	70	101	204
$v_k / (km/h)$	220	214	220	220

Łatwo zauważyć, że prędkość końcowa v_k nie zależy od objętości zbiornika natomiast końcowa energia ruchu zmienia się liniowo wraz z nią. Zależność energii i prędkości w zależności od rodzaju gazu pokazuje tabela 3.

Tabela 3. Wpływ rodzaju gazu na parametry ruchu

Gaz	E / kJ	$v_{max} / (km/h)$
He	12	72
CO ₂	176	286
H ₂	11	72
N ₂	100	216
Powietrze	104	220

5. WNIOSKI

Prędkość końcowa zbiornika zależy liniowo od ciśnienia początkowego P_z . W celu zmniejszenia energii końcowej lepiej obniżyć ciśnienie początkowe P_z niż objętość V_z (i masę), gdyż E maleje z kwadratem dla P_z oraz linowo dla V_z . Istotne jest to, że energia końcowa zbiornika nie jest równa energii zgromadzonej w zbiorniku, którą można wyznaczyć [1] ze wzoru:

$$E = P_z V_z \ln\left(\frac{P_z}{P_o}\right) \quad (10)$$

Energia zgromadzona w zbiorniku w postaci sprężonego gazu dla parametrów odniesienia liczona ze wzoru (10) wynosi 4,8 MJ, podczas gdy wyznaczona energia ruchu jest ponad 44 razy mniejsza i wynosi 104 kJ. Oznacza to, że praktycznie cała energia, bo aż 98%, zmagazynowana w zbiorniku jest przekształcona w energię kinetyczną gazów. Średnica wylotowa D_w nie zmienia energii oraz prędkości końcowej wydłuża jedynie czas wypływu. Stąd zmiany proporcji zbiornika ani sposób i wielkość pęknięcia nie mają znaczenia dla sposobu rozdziału energii pomiędzy energię kinetyczną zbiornika i gazów. W praktyce niezależnie od sposobu pochłaniania energii odrzutu skutki rażenia, czyli rozkład ciśnienia wybuchu wokół zbiornika będzie praktycznie taki sam. Przy tych samych parametrach termodynamicznych energia odrzutu zależy od rodzaju gazu i w przypadku helu jest prawie dziesięć razy mniejsza niż dla azotu lub powietrza, co z kolei oznacza, że przechowywanie w helu postaci sprężonej stanowi mniejsze zagrożenie dla konstrukcji nośnej zbiornika, w przypadku zajścia wybuchu fizycznego, niż azotu lub powietrza.

LITERATURA

- [1] **M. Iseli**, *He-storage tank hazard*, ITER Memo, 1.09.2011.
- [2] **SS Paulsen**, *Pressure Systems Stored-Energy Threshold Risk Analysis*, PNNL-18696, Pacific Northwest National Laboratory Richland, Washington 99352, 08.2009.
- [3] **M. Chorowski, M. Grabowski, A. Jędrusyna, J. Wach**, *Analysis of He-storage tank physical blasting pressure hazard. Theoretical modelling and experimental results*. Raport dla ITER w ramach kontraktu ITER/CT/08/516 Task 2.3, 04.2014.