EWA SUPERNAK, *esuper@pg.gda.pl*
Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
JERZY ZIÓŁKO, *jziolko@pg.gda.pl*
Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

PODCIŚNIENIE W ZBIORNIKACH. WNIOSKI ZE ZDARZEŃ W OSTATNICH LATACH

VACUUM IN TANKS. CONCLUSIONS FROM EVENTS IN RECENT YEARS

Streszczenie W referacie przeanalizowano wpływ zmian ciśnienia i temperatury powietrza na stateczność płaszcza stalowego, pionowego zbiornika walcowego o pojemności 10 000 m^3. Analiza nie dotyczy konkretnego przypadku awarii, przeprowadzono ją obliczeniowo według zasad podanych w odnośnych eurokodach dla zbiornika o wymiarach i konstrukcji często stosowanej w praktyce w obiektach o tej pojemności. Założono, że zbiornik jest pusty, a wszystkie jego włazy i zawory oddechowe są szczelnie zamknięte. Wykazano, że niewielkie wahania ciśnienia i temperatury powietrza mogą spowodować znaczne deformacje płaszcza zbiornika.

Abstract The paper presents an analysis of the influence of air pressure and temperature changes on the shell stability of a vertical cylindrical steel tank with a capacity of 10 000 m^3. The analysis did not concern any specific breakdown, it was carried out numerically in accordance with principles specified in relevant eurocodes for a tank with dimensions and design frequently adopted in practice for objects of such capacity. It was assumed that the tank was empty and all its manholes and vent valves were tightly closed. The analysis proved that small fluctuations of air pressure and temperature may cause significant tank shell deformations.

1. Wprowadzenie

Tematyka niszczącego działania podciśnienia na płaszcze stalowych zbiorników walcowych była poruszana niejednokrotnie na konferencjach naukowo-technicznych w tym również na Konferencjach "Awarie Budowlane" [1], [2], [3], [4], w czasopismach naukowo-technicznych [5], [6], [7], [8] oraz specjalistycznych książkach [11], [12]. Można by więc sądzić, że zarówno zjawisko powstania podciśnienia w zbiorniku jak i metody naprawy uszkodzonych w ten sposób konstrukcji powinny być znane w branżach związanych z budową i eksploatacją baz paliw płynnych, tymczasem przeczą temu fakty. W ostatnich trzech latach, w każdym roku notowano po kilka uszkodzeń zbiorników w wyniku wytworzenia w nich podciśnienia. Ten fakt stał się dla autorów niniejszego referatu bodźcem do powrotu do tematyki podciśnienia w zbiornikach.

W poprzednich publikacjach skupiano się głównie na omawianiu konkretnych awarii zbiorników i metodach napraw tak uszkodzonych konstrukcji. Niniejszy referat został zaplanowany inaczej – nie dotyczy on konkretnej awarii lecz przeprowadzono w nim analizę umownie przyjętego zbiornika celem wykazania jakie muszą zaistnieć zmiany ciśnienia atmosfe-

rycznego i temperatury powietrza aby wystąpiło zjawisko utraty stateczności powłoki walcowej. Uszkodzenie dachu zbiornika występuje znacznie rzadziej, gdyż dach najczęściej jest kopułą utworzoną przez radialne żebra o dużym przekroju poprzecznym dodatkowo zabezpieczone przed wyboczeniem z płaszczyzny systemem płatwi i stężeń kratowych (rys. 2) – dach ma więc dużą sztywność. Ciśnienie krytyczne i stan naprężeń w płaszczu analizowanego zbiornika wykonano zgodnie z zasadami zawartymi w Eurokodach wykazując jak mała różnica ciśnienia atmosferycznego i temperatury powietrza mogą doprowadzić płaszcz zbiornika do stanu awaryjnego. Zagadnienie to zostało omówione na przykładzie umownie przyjętego zbiornika o pojemności 10 000 m^3 i wymiarach oraz konstrukcji, którą można nazwać „typową" dla obiektów o takiej pojemności. Tematyka referatu odpowiada więc pierwszemu z haseł w podtytule Konferencji „Awarie Budowlane" – „Zapobieganie, diagnostyka, naprawy, rekonstrukcje".

2. Charakterystyka analizowanego zbiornika

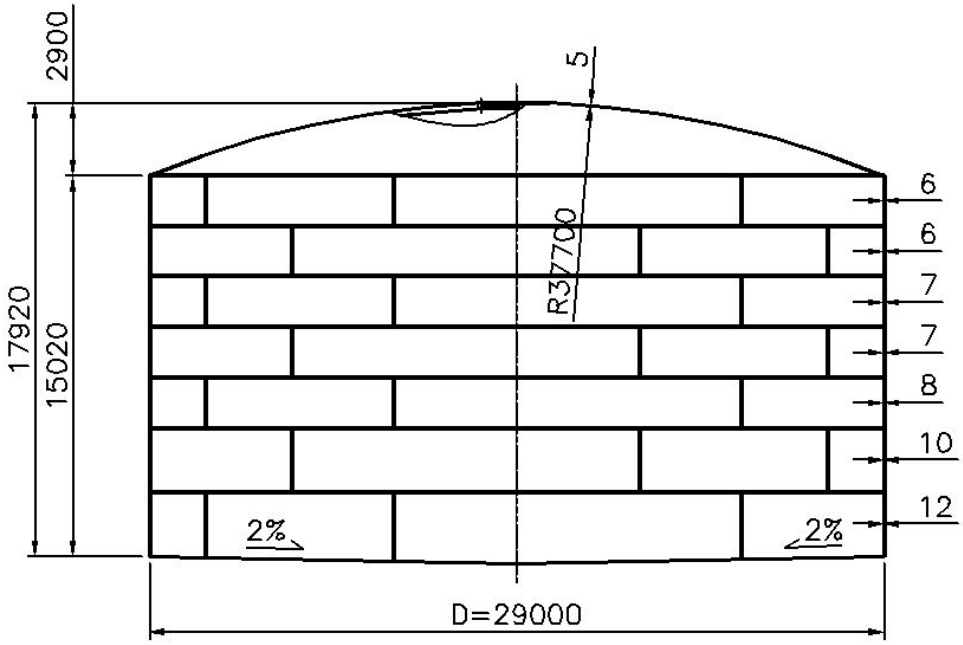
Przyjęty do analizy obliczeniowej zbiornik jest walcowy pionowy, naziemny z dachem stałym i płaskim dnem. Główne jego wymiary odpowiadają najczęściej przyjmowanym w realizowanych projektach i są następujące:

– średnica wewnętrzna płaszcza d_w = 29 000 mm
– wysokość płaszcza h = 15 020 mm
– strzałka kopuły f = 2 900 mm.

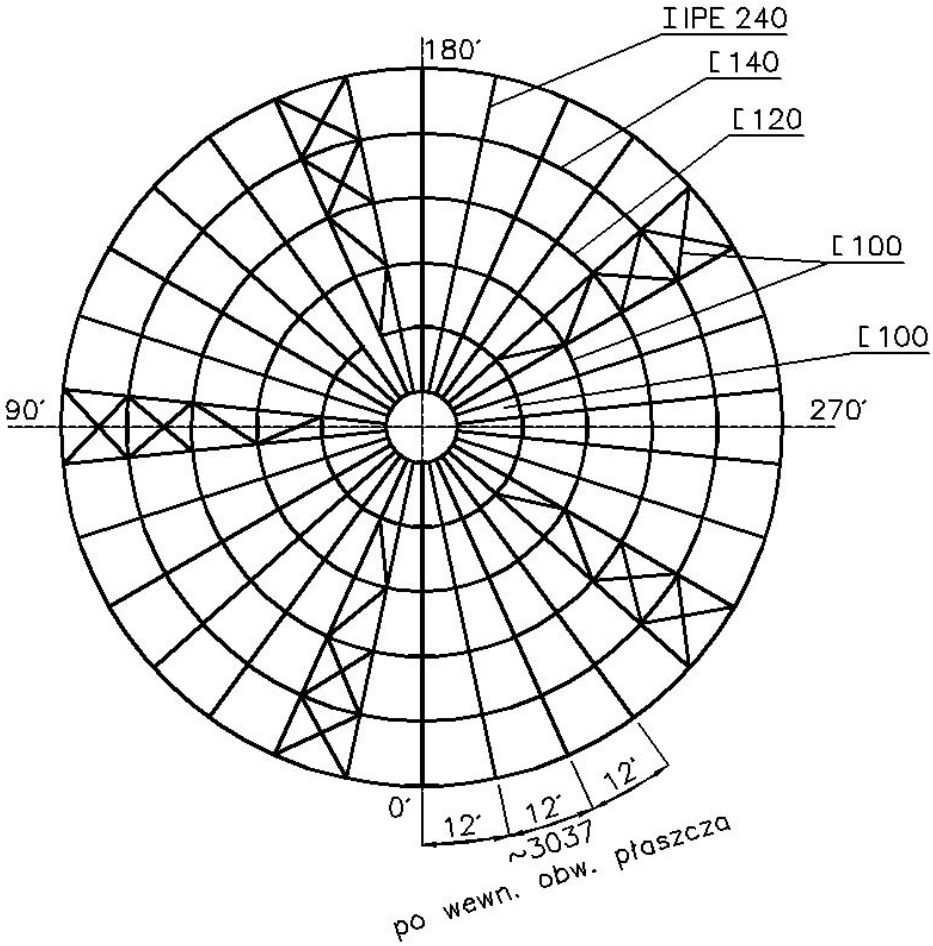
Płaszcz zbiornika składa się z siedmiu pierścieni blach (carg) o następujących wysokościach i grubościach:

– pierścień najniższy (carga I) – wysokość – 2500 mm, grubość 12,0 mm,
– pierścień drugi (carga II) – wysokość – 2500 mm, grubość 10,0 mm,
– pierścień trzeci (carga III) – wysokość – 2000 mm, grubość 8,0 mm,
– pierścień czwarty (carga IV) – wysokość – 2000 mm, grubość 7,0 mm,
– pierścień piąty (carga V) – wysokość – 2000 mm, grubość 7,0 mm,
– pierścień szósty (carga VI) – wysokość – 2000 mm, grubość 6,0 mm,
– pierścień siódmy (carga VII) – wysokość – 2000 mm, grubość 6,0 mm.

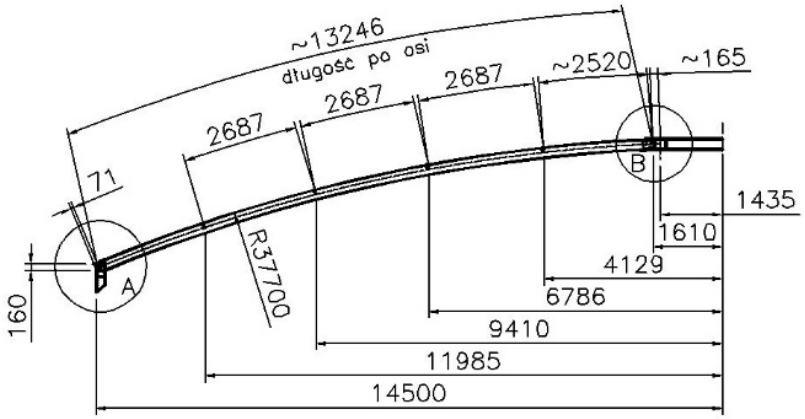
Górna krawędź najwyższej cargi płaszcza, od strony zewnętrznej zbiornika usztywniona jest kątownikiem równoramiennym L80×80×10. Płaszcz zaprojektowano ze stali gatunku S355J2+N, pierścień usztywniający ze stali S235JR. Przekrój zbiornika pokazano na rys. 1.
Dach zbiornika składa się z konstrukcji nośnej (rys. 2) i pokrycia dachowego. Konstrukcja nośna dachu to 30 żeber łukowych wykonanych z dwuteownika IPE 240 ze stali gatunku S235JR+N (rys. 3) opartych na pierścieniu podporowym zespawanym z dwóch ceowników i wspornikach wykonanych z ceownika C200 o długości 500 mm przyspawanych do płaszcza zbiornika (rys. 4). W osi zbiornika żebra połączone są ze zwornikiem o średnicy 3180 mm o konstrukcji przedstawionej na rysunku nr 5. Żebra łukowe połączone są czterema wielobocznymi pierścieniami płatwi wykonanymi z C140, C120 i 2×C100. Pięć pól jest dodatkowo wykratowanych – stanowią stężenie wiatrowe dachu zbiornika. Od strony zewnętrznej wykratowanie jest typu „X", dalej typu „N" (rys. 2). Założono, że wszystkie pręty wykratowania są z C100. Blachy pokrycia dachowego mają grubość 5,0 mm. Wszystkie elementy dachu, poza żebrami łukowymi są ze stali gatunku S235JR.



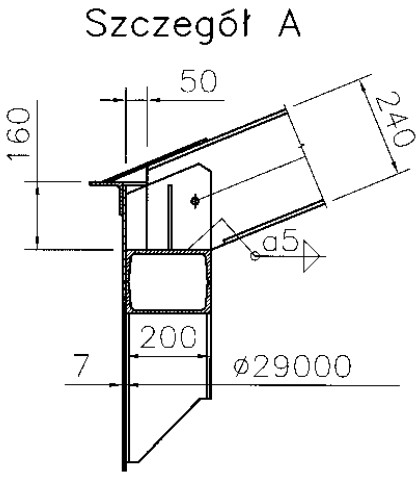
Rys. 1. Rysunek przekroju zbiornika



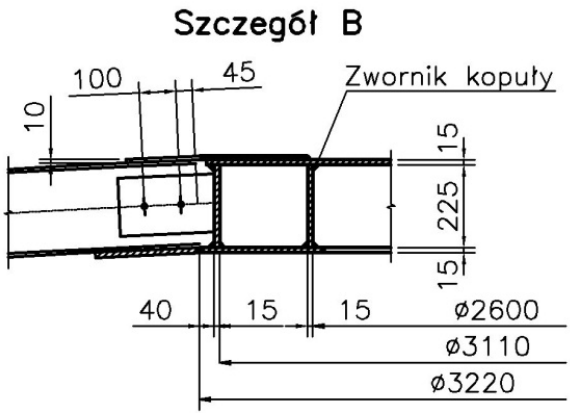
Rys. 2. Rysunek konstrukcji nośnej zbiornika



Rys. 3. Żebro łukowe konstrukcji nośnej zbiornika



Rys. 4. Konstrukcja podparcia żebra łukowego konstrukcji nośnej dachu zbiornika



Rys. 5. Rysunek zwornika, do którego w osi zbiornika mocowane są żebra łukowe konstrukcji nośnej

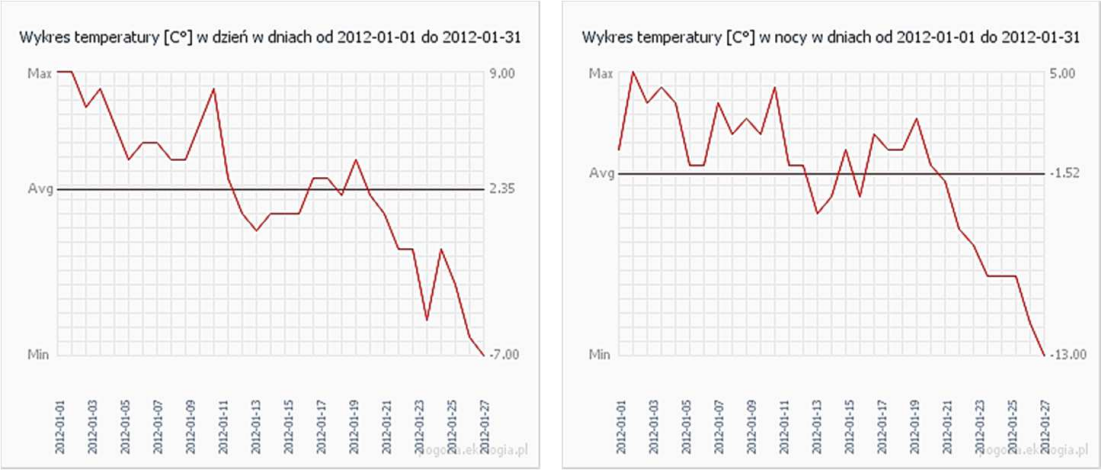
Dno zbiornika i fundament nie będą szczegółowo charakteryzowane gdyż nie ma to znaczenia dla analizy zawartej w dalszej części referatu.

3. Zależność pomiędzy temperaturą i ciśnieniem powietrza a wartością podciśnienia wewnątrz pustego, szczelnie zamkniętego zbiornika

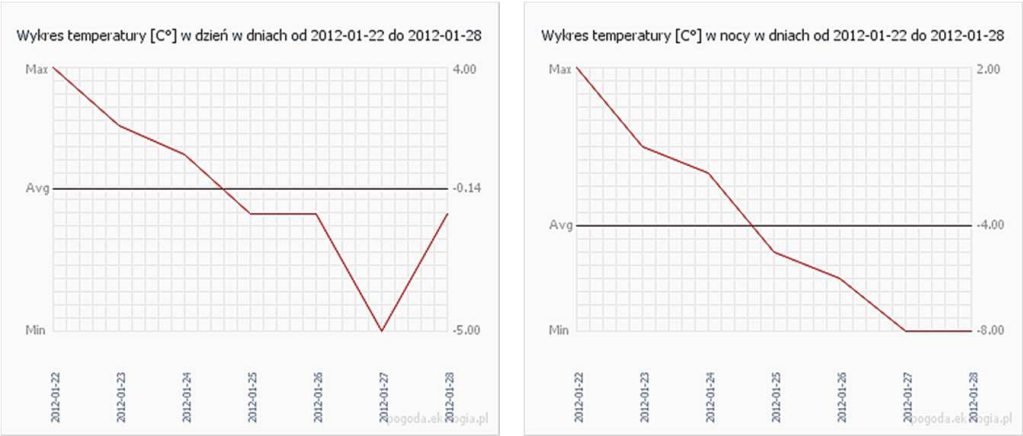
3.1. Przyjęta zmienność warunków pogodowych w miejscu lokalizacji zbiornika

Założono, że hermetyczne zamknięcie zbiornika nastąpiło przy temperaturze dodatniej i niskim ciśnieniu atmosferycznym a obniżenie się temperatury w następnych dniach przy równoczesnym wzroście ciśnienia doprowadziły do wytworzenia w zbiorniku podciśnienia. Wahania temperatury na przestrzeni miesiąca oraz w powiększeniu z tygodnia (rys. 6÷9) dla większych miejscowości w Polsce można znaleźć na stronie internetowej. W analizowanym przykładzie przyjęto umownie jedno z dużych miast i panujące tam w styczniu 2012 roku zmiany warunków atmosferycznych.

http://www.pogoda.ekologia.pl/Archiwum/Archiwum_pogody/....,2012-01-31,miesiac
oraz
http://www.pogoda.ekologia.pl/Archiwum/Archiwum_pogody/.....,2012-01-28,tydzien

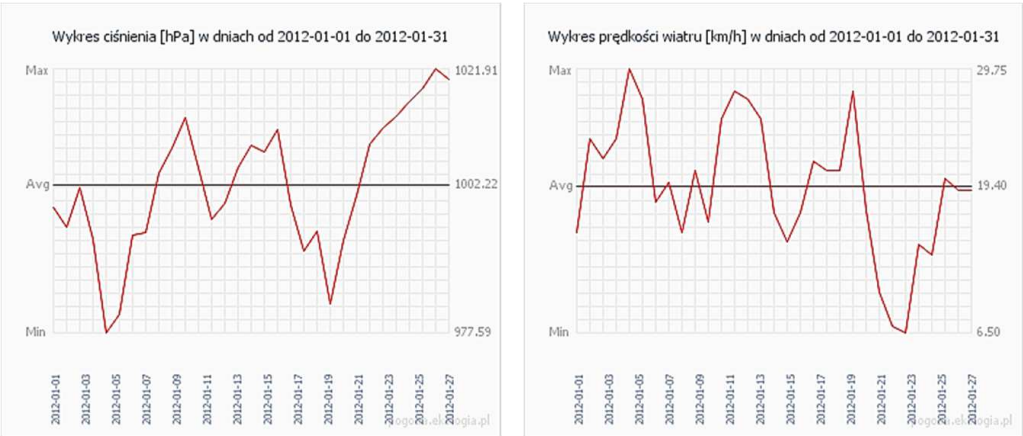


Rys. 6 i 7. Wykresy temperatury w dzień i w nocy dla miejsca lokalizacji zbiornika w styczniu 2012 roku (strona internetowa Archiwum pogody jw.)



Rys. 8 i 9. Wykresy temperatury w dzień i w nocy dla miejsca lokalizacji zbiornika w okresie ostatniego tygodnia stycznia 2012 roku (strona internetowa Archiwum pogody jw.)

Podobne wykresy zestawiono dla ciśnienia powietrza oraz wiatru w tym samym przedziale czasu (rys. 10÷13).

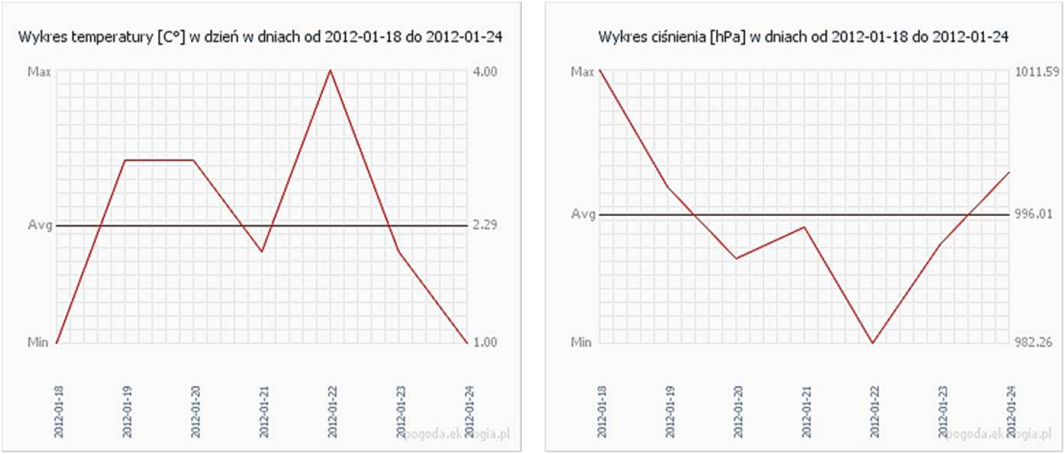


Rys. 10 i 11. Wykresy ciśnienia atmosferycznego i prędkości wiatru dla miejsca lokalizacji zbiornika w styczniu 2012 roku (strona internetowa Archiwum pogody jw.)

Rys. 12 i 13. Wykresy ciśnienia atmosferycznego i prędkości wiatru dla miejsca lokalizacji zbiornika w okresie ostatniego tygodnia stycznia 2012 roku (strona internetowa Archiwum pogody jw.)

3.2. Szacunkowe obliczenia wielkości podciśnienia powstałego w zbiorniku

W czasie zamykania zbiornika temperatura wynosiła od 1÷4°C. Ciśnienie atmosferyczne wahało się między prawie 982,26 hPa a 1001 hPa (rys. 14 i 15). W nocy 26/27 stycznia zarejestrowana temperatura to -6°C, ciśnienie atmosferyczne około 1012 hPa (rys. 9 i 12).



Rys. 14 i 15. Wykresy temperatury w dzień i ciśnienia atmosferycznego dla miejsca lokalizacji zbiornika w czasie jego zamykania (strona internetowa Archiwum pogody jw.)

Równanie Clapeyrona dla gazu

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

gdzie:

p – ciśnienie
V – objętość
n – liczba moli gazu (będąca miarą liczby cząsteczek (ilości) rozważanego gazu)
T – temperatura (bezwzględna), T [K] = t [°C] + 273,15
R – uniwersalna stała gazowa: $R = N_A\, k$,
N_A – stała Avogadra (liczba Avogadra),
k – stała Boltzmanna, R = 8,314 J/(mol·K)

Równanie Clapeyrona dla stanu przed awarią i w trakcie awarii
Dla stanu przed awarią

$$p_1 \cdot V = n \cdot R \cdot T_1$$

Dla stanu w trakcie awarii

$$p_2 \cdot V = n \cdot R \cdot T_2$$

Dla zbiornika jako naczynia zamkniętego objętość jest wielkością niezmienną, więc:

$$\frac{n \cdot R \cdot T_1}{p_1} = \frac{n \cdot R \cdot T_2}{p_2}$$

Dla przemiany izochorycznej przyjęto, że: n oraz R = const. stąd

$$\frac{T_1}{p_1} = \frac{T_2}{p_2}$$

Przyjęto do obliczeń, że:

T_1 – temperatura, w której hermetyzowano zbiornik = +4°C = 273,15 + 4 = 277,15 K
T_2 – temperatura, w której doszło do awarii = -6°C = 273,15 - 6 = 267,15 K
p_1 – ciśnienie, przy którym hermetyzowano zbiornik = 982,26 hPa = 98 kPa
p_2 – ciśnienie, przy którym doszło do awarii = $p_1 + \Delta p_1$

stąd wzór przyjmuje postać:

$$\frac{T_1}{p_1} = \frac{T_2}{p_1 + \Delta p_2}$$

Obliczenie podciśnienia powstałego na skutek zmiany temperatury

$$\Delta p_1 = \frac{T_2 \cdot p_1}{T_1} - p_1 = \frac{267{,}15 \cdot 98}{277{,}15} - 98 = -3{,}54 \text{ kPa}$$

Obliczenie podciśnienia w przestrzeni gazowej zbiornika powstałego na skutek zmiany ciśnienia atmosferycznego.

p_1 – ciśnienie, przy którym hermetyzowano zbiornik = 982,26 hPa = 98 kPa
p_2 – ciśnienie przy którym doszło do awarii = 1012 hPa = 101,2 kPa

$$\Delta p_2 = p_1 - p_2 = 98 - 101{,}2 = -3{,}2 \text{ kPa}$$

Całkowite podciśnienie w przestrzeni gazowej zbiornika wywołane zmianą temperatury oraz wzrostem ciśnienia atmosferycznego liczone od dnia zamknięcia zbiornika do dnia awarii

$$\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2 = -3{,}54 - 3{,}2 = -6{,}74 \text{ kPa}$$

3.3. Obliczenie krytycznego naprężenia obwodowego w powłoce analizowanego płaszcza zbiornika według PN-EN 1993-1-6 [9]

Dane do obliczeń: wysokości carg i ich grubości

h_1 = 2500 mm; t_1 = 12 mm
h_2 = 2500 mm; t_2 = 10 mm
h_3 = 2000 mm; t_3 = 8 mm
h_4 = 2000 mm; t_4 = 7 mm
h_5 = 2000 mm; t_5 = 7 mm
h_6 = 2000 mm; t_6 = 6 mm
h_7 = 2000 mm; t_7 = 6 mm

r = 14500 mm – promień zbiornika

Obliczenie długości i grubości równoważnej powłoki trójdzielnej (pkt D.2.3.1.)

L = 15000 mm

l_a = 7500 mm

$$t_a = \frac{1}{l_a} \cdot (h_7 \cdot t_7 + h_6 \cdot t_6 + h_5 \cdot t_5 + 1500 \cdot h_4) = \frac{1}{7500} \cdot 48500 = 6{,}47 \text{ mm}$$

$$l_b = l_c = 0{,}5.\ (L - l_a) = 0{,}5.\ (15000 - 7500) = 3750 \text{ mm}$$

$$t_b = \frac{1}{l_b} \cdot (500 \cdot t_4 + h_3 \cdot t_3 + 1250 \cdot h_2) = \frac{1}{3750} \cdot 32000 = 8{,}53 \text{ mm}$$

$$t_c = \frac{1}{l_c} \cdot (1250 \cdot t_2 + h_1 \cdot t_1) = \frac{1}{3750} \cdot 42500 = 11{,}33 \text{ mm}$$

Zastąpienie równoważnej powłoki trójdzielnej powłoką równoważną o stałej grubości $t = t_a$ i długości efektywnej l_{eff} (wzór D.61)

$$\frac{l_a}{L} = \frac{7500}{15000} = 0{,}5 \qquad \frac{t_c}{t_a} = \frac{11{,}33}{6{,}47} = 1{,}75 \qquad \frac{t_b}{t_a} = \frac{8{,}53}{6{,}47} = 1{,}32$$

κ = 0,8 (rys. D.6 diagram prawy [9], pomocniczo [10])

$$l_{eff} = \frac{l_a}{\kappa} = \frac{7500}{0{,}8} = 9375 \text{ mm}$$

Określenie długości powłoki (wzór D.20)

$$C_\theta = 1{,}0 \qquad \omega = \frac{l_{eff}}{\sqrt{r \cdot t_a}} = \frac{9375}{\sqrt{14500 \cdot 6{,}47}} = 30{,}61$$

Powłoka o średniej długości powinna spełniać poniższy warunek:

$$20 \le \frac{\omega}{C_\theta} \le 1{,}63 \cdot \frac{r}{t_a} \qquad 20 < \frac{30{,}61}{1{,}0} = 30{,}61 < 1{,}63 \cdot \frac{14500}{6{,}47} = 3653$$

Warunek został spełniony – powłoka o średniej długości

Naprężenie krytyczne obwodowe przy wyboczeniu sprężystym powłoki o średniej długości wynosi (wzór D.21)

$$\sigma_{\theta,Rcr,eff} = 0{,}92 \cdot E \cdot \left(\frac{C_\theta}{\omega}\right) \cdot \left(\frac{t_a}{r}\right) = 0{,}92 \cdot 210000 \cdot \left(\frac{1{,}0}{30{,}61}\right) \cdot \left(\frac{6{,}47}{14500}\right) = 2{,}816 \text{ MPa}$$

Dla poszczególnych carg naprężenia krytyczne obwodowe wynoszą (wzór D.62):

$$\sigma_{\theta,Rcr,1} = \left(\frac{6{,}47}{12{,}0}\right) \cdot 2{,}816 = 1{,}518 \text{ MPa} \qquad \sigma_{\theta,Rcr,2} = \left(\frac{6{,}47}{10{,}0}\right) \cdot 2{,}816 = 1{,}822 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\theta,Rcr,3} = \left(\frac{6{,}47}{8{,}0}\right) \cdot 2{,}816 = 2{,}277 \text{ MPa} \qquad \sigma_{\theta,Rcr,4,5} = \left(\frac{6{,}47}{7{,}0}\right) \cdot 2{,}816 = 2{,}603 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\theta,Rcr,6,7} = \left(\frac{6{,}47}{6{,}0}\right) \cdot 2{,}816 = 3{,}037 \text{ MPa}$$

Naprężenie ściskające obwodowe wywołane podciśnieniem o wartości -6,74 kPa dla poszczególnych carg wynoszą:

$$\sigma_1 = |-6{,}74| \cdot \frac{14500}{12{,}0} = 8144{,}167 \text{ kPa} = 8{,}144 \text{ MPa} > \sigma_{\theta,Rcr,1} = 1{,}518 \text{ MPa}$$

$$\sigma_2 = |-6{,}74| \cdot \frac{14500}{10{,}0} = 9773 \text{ kPa} = 9{,}773 \text{ MPa} > \sigma_{\theta,Rcr},2 = 1{,}822 \text{ MPa}$$

$$\sigma_3 = |-6{,}74| \cdot \frac{14500}{8{,}0} = 12216{,}25 \text{ kPa} = 12{,}216 \text{ MPa} > \sigma_{\theta,Rcr},3 = 2{,}277 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{4,5} = |-6{,}74| \cdot \frac{14500}{7{,}0} = 13961{,}429 \text{ kPa} = 13{,}961 \text{ MPa} > \sigma_{\theta,Rcr},4{,}5 = 2{,}603 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{6,7} = |-6{,}74| \cdot \frac{14500}{6{,}0} = 16288{,}333 \text{ kPa} = 16{,}288 \text{ MPa} > \sigma_{\theta,Rcr},6{,}7 = 3{,}037 \text{ MPa}$$

Naprężenie ściskające obwodowe wywołane podciśnieniem o wartości -0,5 kPa tj. podciśnieniem, przy którym według wymagań eksploatacyjnych otwierają się zawory oddechowe, dla poszczególnych carg wynoszą:

$$\sigma_1 = |-0{,}5| \cdot \frac{14500}{12{,}0} = 604 \text{ kPa} = 0{,}604 \text{ MPa} < \sigma_{\theta,Rcr,1} = 1{,}518 \text{ MPa}$$

$$\sigma_2 = |-0{,}5| \cdot \frac{14500}{10{,}0} = 725 \text{ kPa} = 0{,}725 \text{ MPa} < \sigma_{\theta,Rcr,2} = 1{,}822 \text{ MPa}$$

$$\sigma_3 = |-0{,}5| \cdot \frac{14500}{8{,}0} = 906 \text{ kPa} = 0{,}906 \text{ MPa} < \sigma_{\theta,Rcr,3} = 2{,}277 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{4,5} = |-0{,}5| \cdot \frac{14500}{7{,}0} = 1036 \text{ kPa} = 1{,}036 \text{ MPa} < \sigma_{\theta,Rcr,4,5} = 2{,}603 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{6,7} = |-0{,}5| \cdot \frac{14500}{6{,}0} = 1208 \text{ kPa} = 1{,}208 \text{ MPa} < \sigma_{\theta,Rcr,6,7} = 3{,}037 \text{ MPa}$$

Naprężenie krytyczne przy wyboczeniu sprężystym zostało mocno przekroczone dla wszystkich carg, deformacje w wielu miejscach spowodowały uplastycznienie stali, a w konsekwencji mogą powstać lokalne ostre załamania blach.

4. Podsumowanie

W omawianym zbiorniku hermetycznie zamkniętym amplituda temperatury powietrza wynosząca zaledwie 10°C oraz różnica ciśnienia atmosferycznego tylko około 32 hPa (podciśnienie = 6,74 kPa) spowodowały, że naprężenia krytyczne w płaszczu tego zbiornika przy wyboczeniu sprężystym przekroczone zostały ponad pięciokrotnie.

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_{\theta,Rcr,1}} = \frac{\sigma_2}{\sigma_{\theta,Rcr,2}} = \frac{\sigma_3}{\sigma_{\theta,Rcr,3}} = \frac{\sigma_{4,5}}{\sigma_{\theta,Rcr,4,5}} = \frac{\sigma_{6,7}}{\sigma_{\theta,Rcr,6,7}} = 5{,}34$$

Jest to bardzo ważne ostrzeżenie dla użytkowników zbiorników. Maksymalna wartość podciśnienia, która mogła być wytworzona w tym zbiorniku (szczelnie zamkniętym), nie powodując deformacji jego płaszcza, mogła wynosić:

$$\frac{-6{,}74}{5{,}34} = -1{,}262 \text{ kPa}$$

Zamieszczone w punkcie 3. obliczenia wykonano wykorzystując Eurokod 1993-1-6 [9]. Warto także przytoczyć wzór podany przez R. Greinera i J.M. Rottera w pracy [8], który w sposób bezpośredni pozwala oszacować maksymalną wartość podciśnienia, dopuszczalną dla zbiornika o określonych parametrów. Wzór ten ma następującą postać:

$$q_{RCr} = 0{,}92 \cdot C_\theta \cdot E \cdot \frac{r}{l_{eff}} \cdot \left(\frac{t_a}{r}\right)^{2,5}$$

Po podstawieniu do wzoru wartości wyliczonych dla omawianego zbiornika otrzymamy

$$q_{RCr} = 0{,}92 \cdot 1{,}0 \cdot 210000 \frac{14500}{9375} \cdot \left(\frac{6{,}47}{14500}\right)^{2,5} = 0{,}001257 \text{ N/mm}^2 = 1{,}257 \text{ kPa}$$

oznacza to zgodność z wcześniejszymi obliczeniami i wskazuje na prosty sposób szacowania dopuszczalnej wartości podciśnienia dla pustego zbiornika hermetycznie zamkniętego. W przeprowadzonych obliczeniach pominięto wpływ obciążenia wiatrem na pusty zbiornik.

Literatura

1. Ziółko J., Supernak E.: Naprawa zbiorników stalowych po awaryjnym uszkodzeniu płaszczy. Konferencja Naukowo-Techniczna "Awarie Budowlane" Szczecin- Międzyzdroje 1995.
2. Ziółko J., Supernak E., Borek P., Jędrzejewski M.T.: Naprawa zbiorników cylindrycznych uszkodzonych przez wytworzone w nich podciśnienie. Sympozjum „Współczesne problemy remontów zbiorników paliw płynnych w świetle obowiązujących norm” Centrum Edukacji „ALIAS”, Poznań 1998.
3. Ziółko J.: Remonty i wzmocnienia zbiorników stalowych. XV Ogólnopolska Konferencja "Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji" Ustroń - Katowice 2000.
4. Ziółko J., Supernak E.: Naprawa stalowego zbiornika uszkodzonego przez podciśnienie. Konferencja naukowo – techniczna „Problemy eksploatacyjne baz magazynowych produktów naftowych” Centrum Edukacji „ALIAS”, Poznań 2011.
5. Supernak E.: Oprava ocelóvej nádrže po hávarijnom pokojeni pláštá. „Inžinierske stalby” nr 2/1996.
6. Ziółko J.: Reparatur von Dächern und Mänteln durch Unterdruck verformter Stahltanks. „Stahlbau“ nr 6/2001.
7. Hotała E.: Implozje w stalowych zbiornikach bezciśnieniowych na podgrzewane ciecze. „Materiały Budowlane” nr 11/2005.
8. Greiner R., Rotter J.M.: 11 Cylindrical shells of stepwise variable wall thickness. European Shell Buckling Recommendations: Chapter 11. 8th Draft July 2008.
9. PN-EN 1993-1-6: czerwiec 2009. Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-6: Wytrzymałość i stateczność konstrukcji powłokowych.
10. DIN 18800 Teil 4: November 1990. Stahlbauten. Stabilitätsfälle, Schalenbeulen.
11. Ziółko J.: Zbiorniki metalowe na ciecze i gazy. Arkady, Warszawa 1986.
12. Agõs Z., Ziółko J., Vičan J., Brodniansky J.: Assessment and Refurbishment of Steel Structures. Spon Press London, New York, Bratislava 2005.