

Stateczność płaszcza stalowego zbiornika walcowego pionowego obciążonego podciśnieniem Stability of the steel shell of a vertical cylindrical tank under vacuum

Jerzy Ziólko¹, Tomasz Mikulski², Ewa Supernak³

¹ *Katedra Konstrukcji Budowlanych,
Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy*

*Department of Civil Engineering Structures,
Faculty of Civil Engineering, Architecture and Environmental Engineering, University of Technology and Life Sciences
Al. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz
e-mail: jziolko@pg.gda.pl*

² *Katedra Mechaniki Budowli i Mostów
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska*

*Department of Structure and Bridge Mechanics
Faculty of Civil and Environmental Engineering, Gdansk University of Technology
ul. G. Narutowicza 11/12, 80-223 Gdańsk
e-mail: tomi@pg.gda.pl*

³ *Katedra Konstrukcji Metalowych i Zarządzania w Budownictwie
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska*

*Department of Metal Structures and Management in the Building Engineering
Faculty of Civil and Environmental Engineering, Gdansk University of Technology
ul. G. Narutowicza 11/12, 80-223 Gdańsk
e-mail: Ewa.Supernak@wilis.pg.gda.pl*

Streszczenie

Podciśnienie w zbiorniku z dachem stałym może powstać zarówno w końcowym etapie jego budowy (gdy zbiornik po zakończeniu montażu oczekuje na włączenie go do eksploatacji i ma szczelnie zamknięte wszystkie włazy mogące wprowadzić powietrze do zbiornika) jak i podczas eksploatacji gdy jest opróżniany a zawory oddechowe są zamknięte lub mają ograniczoną drożność. Podciśnienie graniczne powodujące utratę stateczności płaszcza zbiornika zależy zarówno od jego konstrukcji (grubości blach płaszcza) jak i od stopnia wypełnienia zbiornika cieczą. W referacie analizę podciśnienia granicznego przeprowadzono dla zbiornika o pojemności 5000 m³ mającego konstrukcję odpowiadającą rozwiązaniom najczęściej stosowanym w praktyce. Analizę obliczeniową wykonano zarówno metodą elementów skończonych (program MSC NASTRAN) jak i metodą uproszczoną podaną w normie PN-EN 1993-1-6: czerwiec 2009 [1].

Abstract

Vacuum may develop in a fixed roof tank both in the final stage of tank construction (when the tank after completion of assembly work waits for being put into operation and all its manholes that might let air inside are tightly closed) and in the course of operation, when the tank is being emptied and its breather valves are closed or have a limited flow capacity. The limiting vacuum which causes a stability loss of the tank shell depends on both the tank structure (the shell plate thickness) and the degree of filling with the liquid. In the paper an analysis of the limiting vacuum is carried out for a 5000 m³ tank whose design corresponds to those used most often in practice. For the numerical analysis both the finite element method (MSC NASTRAN software) and a simplified method as described in PN-EN 1993-1-6 June 2009 [1] were used.

Słowa kluczowe: konstrukcje stalowe, powłoki walcowe pionowe, stateczność, podciśnienie graniczne
Keywords: steel structures, vertical cylindrical shells, stability, limiting vacuum

1. Wstęp

Podciśnienie graniczne powodujące utratę stateczności zbiornika zależy nie tylko od konstrukcyjnych rozwiązań projektowych ale także od stopnia wypełnienia zbiornika magazynowaną cieczą. Zwiększenie wypełnienia zbiornika magazynowaną cieczą powoduje zwiększenie obwodowych naprężeń rozciągających w płaszczu i opóźnia wystąpienie deformacji płaszcza - wartość podciśnienia granicznego wzrasta. Grubość blach górnej części płaszcza też może być przyjmowana przez projektanta w różny sposób, np. według PN-EN 14015: czerwiec 2010 [2] minimalna grubość blach ze

1. Introduction

The limiting vacuum which causes a stability loss of the tank depends not only on the design solutions but also on the degree of tank filling with the liquid stored. An increase of the amount of liquid stored in the tank leads to an increase of circumferential tensile stresses in the shell and delays the occurrence of shell deformation – the limiting vacuum value increases. Also a different approach of the design engineers to the thickness of plates in the upper part of the shell is possible. For instance, according to PN-EN 14015: June 2010 [2] the minimum thickness of carbon and carbon-manganese steel

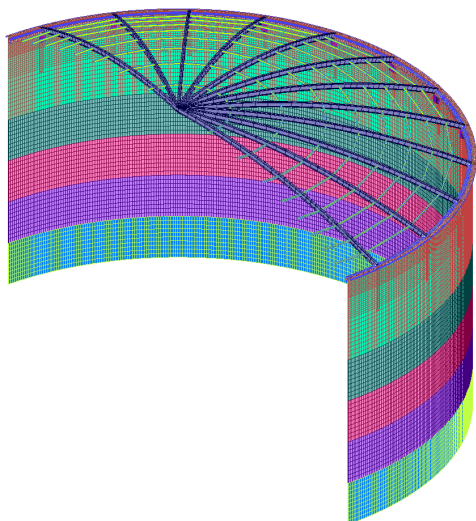
stali węglowej i węglowo-manganowej dla zbiornika o średnicy większej od 15,0 m i nie przekraczającej 30,0 m wynosi 6,0 mm podczas gdy w PN-B-03210: październik 1997 [3] minimalna grubość dla średnic w tym zakresie wynosi 5,0 mm. Projektant może ponadto przyjąć naddatek na korozję, dlatego w referacie przeanalizowano zbiornik, którego górne blachy płaszczu mają grubość 5,0; 6,0 i 7,0 mm.

2. Przedmiot analizy przeprowadzonej w referacie

W referacie przeprowadzono analizę obliczeniową zbiornika o pojemności 5000 m³ (średnica wewnętrzna płaszczu 24800 mm, wysokość płaszczu 12000 mm). Zbiornik ma kopułasty dach stały, którego głównymi elementami nośnymi są 24 żebra łukowe. Cały obiekt zaprojektowany jest ze stali S235J2. Płaszcz składa się z sześciu pierścieni blach o grubościach (licząc od dołu) 15,0; 13,0; 10,0; 8,0; 5,0 i 5,0 mm. W istniejących zbiornikach o tych wymiarach żebra konstrukcji nośnej dachu oparte są albo na przyspawanym od wewnątrz do płaszczu pierścieniu wieńczącym górną jego krawędź albo na pierścieniu wieńczącym górną krawędź płaszczu dodatkowo podpartym na pionowych słupkach przyspawanych do najwyższych blach płaszczu. Słupki te mają wysokość od 500 do 1500 mm i wykonane są najczęściej z dwuteowników lub ceowników. W referacie przeanalizowano celowość stosowania tych słupków rozpatrując alternatywnie ich zastosowanie lub pominięcie (w alternatywie ze słupkami miały one długość 500 mm).

3. Model do obliczeń numerycznych

Obliczenia wykonano metodą elementów skończonych stosując program MSC NASTRAN [4]. Opracowano pierwotny model obliczeniowy połowy zbiornika w przekroju pionowym - rys. 1 (miał on 43602 węzły i 44596 elementów). Drugi model zredukowano do wycinka sektora zbiornika (o kącie środkowym wynoszącym 45°) obejmującego trzy dachowe żebra łukowe - rys. 2 (liczba węzłów - 10986, liczba elementów - 11149). Otrzymane wyniki naprężeń i przemieszczeń są niemal identyczne, zatem w dalszych analizach wykonywano obliczenia modelu zredukowanego.



Rys. 1. Pierwotny model obliczeniowy zbiornika
Fig. 1. Original computational model of the tank

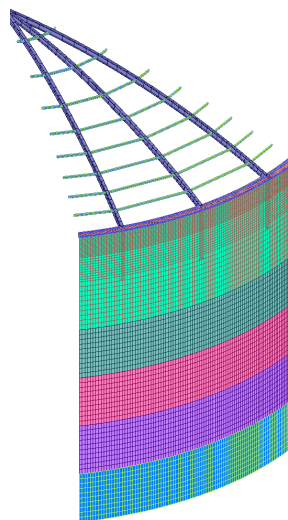
plates for a tank with a diameter larger than 15,0 m and not exceeding 30,0 m is equal to 6,0 mm, while according to PN-B-03210: October 1997 [3] the minimum thickness for diameters in that range equals 5,0 mm. The design engineer can also add a corrosion allowance. For those reasons a tank with upper plates of the shell 5,0, 6,0 and 7,0 mm thick was analyzed in the paper.

2. Object of the analysis made in the paper

The paper presents a computational analysis of a 5000 m³ tank (the inner diameter of the shell equal to 24800 mm, the shell height amounting to 12000 mm). The tank roof is a fixed dome supported on 24 arc wise ribs which are its main bearing components. The entire structure is made of S235J2 steel. The shell is composed of six rings made of plates with thicknesses (counting from below) of 15,0; 13,0; 10,0; 8,0; 5,0 and 5,0 mm. The existing tanks of such dimensions have ribs of the roof bearing structure supported either by a ring welded to the inside of the shell and topping its upper edge or by a ring topping the upper edge of the shell and supported additionally by vertical posts welded to the top plates of the shell. These posts are 500 to 1500 mm high and are most often made of U-irons or I-bars. Usefulness of adoption of those posts was analyzed in the paper. To this end alternatives with posts (500 mm long) or without them were taken into consideration.

3. Model adopted for numerical calculations

For calculations the finite element analysis MSC NASTRAN program [4] was adopted. An original computational model was developed for a tank half in a vertical section, as shown in Fig. 1 (the model included 43602 nodes and 44596 elements). A second model was reduced to a segment, cut out of the tank (with the central angle of 45°) and including three arc wise roof ribs - Fig.2 (number of nodes - 10986, number of elements - 11149). The results obtained for stresses and displacements were almost identical, therefore the further analyses were made for the reduced model.



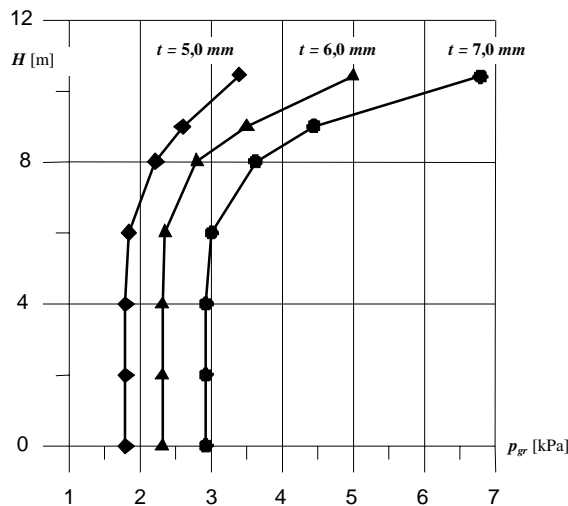
Rys. 2. Zredukowany model obliczeniowy zbiornika
Fig. 2. Reduced computational model of the tank

4. Wyniki obliczeń numerycznych

Na rys. 3 podano uzyskane z obliczeń numerycznych zależności pomiędzy wartościami podciśnienia granicznego dla blach grubości 5,0; 6,0 i 7,0 mm a poziomami wypełnienia zbiornika produktem naftowym o ciężarze właściwym $\rho = 9,5 \text{ kN/m}^3$. Przy napełnieniu zbiornika od 0 do 6,0 m wartości podciśnienia granicznego są praktycznie stałe a przy większym napełnieniu zbiornika dość gwałtownie rosną.

4. Results of numerical calculations

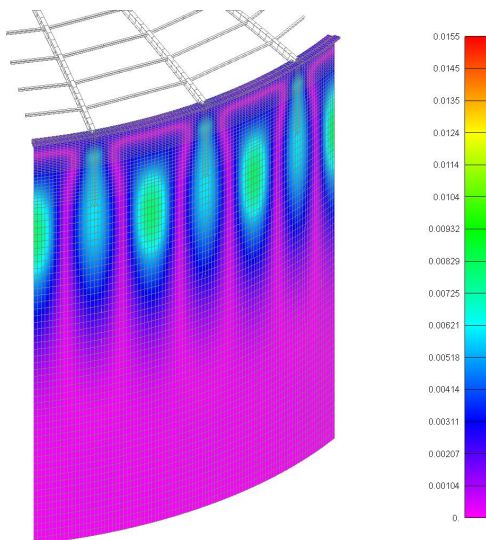
Fig. 3 shows relations, obtained from the numerical calculations, between the limiting vacuum values for plates 5,0; 6,0 and 7,0 mm thick and the level of tank filling with a petroleum product having the specific gravity $\rho = 9,5 \text{ kN/m}^3$. For filling levels from 0 up to 6,0 m the limiting vacuum values are almost constant, while for higher levels they rise quite rapidly.



Rys. 3. Wpływ poziomu napełnienia zbiornika cieczą H [m] na wartość podciśnienia granicznego p_{gr} [kPa]
 Fig. 3. The influence of product level H [m] in the tank on the limiting vacuum value p_{gr} [kPa]

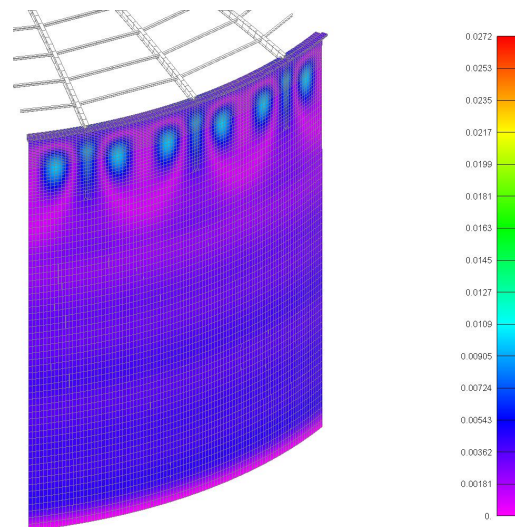
Obszar zdeformowanej części płaszczu koncentruje się w górnej jego połowie (rys. 4) i obejmuje znaczną powierzchnię. Natomiast przy napełnieniu zbiornika do poziomu 10,4 m (1,6 m poniżej górnej krawędzi płaszczu zbiornika) deformacje są znacznie mniej rozległe (rys. 5), ale w sąsiedztwie połączenia żeber dachowych z płaszczem następuje uplastycznienie stali.

The area of deformed part of the shell concentrates in its upper part (fig. 4) and covers a considerable surface of the shell. On the other hand, for the filling level of 10,4 m (1,6 m below the tank shell upper edge) deformations are much less extensive (fig. 5), but close to the roof rib joints with the shell plasticization of steel occurs.



Rys. 4. Stan deformacji płaszczu zbiornika [m] – pusty zbiornik

Fig. 4. Tank shell deformation [m] – empty tank



Rys. 5. Stan deformacji płaszczu zbiornika [m] – zbiornik napełniony produktem do wysokości 10,4 m

Fig. 5. Tank shell deformation [m] – the tank filled up to 10,4 m with the product

Mapy naprężeń w płaszczu zbiornika jak również zakres deformacji płaszcza przy innych, pośrednich poziomach napełnienia zbiornika będą podane w pełnym tekście referatu. Stwierdzono także, że podpieranie słupkami pierścienia wieńczącego płaszcz zbiornika jest bezcelowe gdyż tylko w minimalnym stopniu wpływa ono na wartość podciśnienia granicznego.

5. Wyznaczenie podciśnienia granicznego metodą uproszczoną według PN-EN 1993-1-6 [1]

Podciśnienie graniczne można wyznaczyć także metodą podaną w PN-EN 1993-1-6. Należy jednak zaznaczyć, że uzyska się wartość przybliżoną gdyż stosuje się wzory empiryczne, nie analizuje się powłoki walcowej o skokowo zmieniającej się grubości pierścieni płaszcza lecz powłokę zastępczą. Ponadto w obliczeniach nie uwzględnia się istnienia dachu stałego zbiornika a jedynie utwierdzenie górnej krawędzi płaszcza. Jednakże nakład pracy jest znacznie mniejszy niż przy analizie numerycznej omówionej w referacie. Poniżej zestawiono wyniki uzyskane obydwojema metodami.

Tabela 1. Wartości podciśnienia granicznego dla pustego zbiornika wyznaczona dwoma metodami dla różnych grubości blach najwyższego pierścienia.

Table 1. Limiting vacuum values for an empty tank obtained using the two methods for different thickness of plates of the top ring.				
Grubość blach najwyższego pierścienia płaszcza zbiornika Plates thickness of topmost shell ring of tank		5 mm	6 mm	7 mm
Wartość podciśnienia granicznego wyznaczona metodą Value of limiting vacuum determined with method	numeryczną numerical	1,8 kPa 100 %	2,4 kPa 100 %	2,9 kPa 100 %
	według PN-EN 1993-1-6 according PN-EN 1993-1-6	2,1 kPa 117 %	2,6 kPa 108%	3,0 kPa 103 %

Wyniki uzyskane dwoma różnymi metodami obliczeniowymi są porównywalne, największa różnica dotyczy płaszcza, którego najwyższe pierścienie blach mają grubość 5,0 mm, przy czym PN-EN 1993-1-6 jako minimalną zaleca stosować blachę grubości 6,0 mm. Warto także zwrócić uwagę na publikację [5], i zamieszczony w niej wzór (1), który w sposób bezpośredni pozwala oszacować wartość podciśnienia granicznego.

$$p_{gr} = 0,92 \cdot C_{\theta} \cdot E \cdot \frac{r}{l_{eff}} \cdot \left(\frac{t_a}{r} \right)^{2,5} \quad (1)$$

Pokrewna tematyka omawiana jest w publikacjach [6] - [9].

Maps of stresses in the tank shell as well as the extent of shell deformations at other, intermediate levels of tank filling, will be presented in the full text of the paper. It was also ascertained that use of posts to support the tank shell topping ring is fruitless, as that only slightly affects the limiting vacuum value.

5. Determination of the limiting vacuum value by the simplified method according to PN-EN-1993-1-6 [1]

The limiting vacuum can also be determined using the method presented in PN-EN-1993-1-6. It should be noted, however, that an approximate value will be obtained, as empirical formulae are used and a substitute shell is analyzed rather than a cylindrical shell with stepwise thickness changes of shell rings. Besides, in these calculations fixing of the shell top edge is considered instead of the tank fixed roof. On the other hand, the labor consumption is much smaller than for the numerical analysis described in the paper. Shown below are results obtained with both methods.

The results obtained using the two different calculation methods are comparable, the largest difference concerning a shell where the topmost ring plates are 5,0 mm thick. Note, however, that PN-EN-1993-1-6 recommends using 6,0 mm plate as the minimum. Worth noting is also publication [5] and formula (1) therein, which allows one to directly estimate the limiting vacuum value:

Similar topics are discussed in references [6] - [9].

Literatura • References

- [1] PN-EN 1993-1-6: czerwiec 2009, Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-6: Wytrzymałość i stateczność konstrukcji powłokowych.
- [2] PN-EN 14015: czerwiec 2010, Specyfikacja dotycząca projektowania i wytwarzania na miejscu zbiorników pionowych, o przekroju kołowym, z dnem płaskim, naziemnych, stalowych spawanych, na cieple o temperaturze otoczenia i wyższej.
- [3] PN-B-03210: październik 1997, Konstrukcje stalowe. Zbiorniki walcowe pionowe na cieple. Projektowanie i wykonanie.
- [4] Górski J., Mikulski T., (2006), Obliczenia numeryczne stalowych zbiorników walcowych z imperfekcjami geometrycznymi, Inżynieria I Budownictwo, nr 9, s.473-476.
- [5] Greiner R., Rotter J.M., (2008), *11 Cylindrical shells of stepwise variable wall thickness*. European Shell Buckling Recommendations: Chapter 11. 8th Draft July.
- [6] Hotała E., (2003), *Nośność graniczna nieuzbrojonych cylindrycznych płaszczy silosów stalowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
- [7] Supernak E., (1996), *Oprawa ocel'owej nádrže po hávarijnom poškodení plášt'a*, Inžinierske stavby nr 2, s.78-80.
- [8] Supernak E., Ziółko J., (2013), *Podciśnienie w zbiornikach. Wnioski ze zdarzeń w ostatnich latach*, Konferencja Awaryjne Budowlane, Szczecin-Międzyzdroje, 21-24 maja 2013, s.589-598.
- [9] Ziółko J., Schneider W., Białek T., Heizig T., Gettel M., (2009), *Längenabhängigkeit des Beulwiderstands umfangsdruckbeanspruchter stähler Kreiszylinderschalen*, Stahlbau, nr 11.