

## **Analiza modalna stalowego zbiornika walcowego z dachem stałym przy różnym poziomie wypełnienia**

**Daniel Burkacki<sup>1</sup>, Michał Wójcik<sup>2</sup>, Robert Jankowski<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> *Katedra Konstrukcji Metalowych i Zarządzania w Budownictwie, Wydział Inżynierii Łądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska, e-mail: daniel.burkacki@op.pl*

<sup>2</sup> *Katedra Budownictwa i Inżynierii Materiałowej, Wydział Inżynierii Łądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska, e-mail: mwojcik@pg.gda.pl*

<sup>3</sup> *Katedra Konstrukcji Metalowych i Zarządzania w Budownictwie, Wydział Inżynierii Łądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska, e-mail: jankowr@pg.gda.pl*

**Streszczenie:** W branżach technicznych, takich jak przemysł chemiczny czy naftowy, stalowe zbiorniki walcowe są często wykorzystywane do magazynowania produktów płynnych. Z tego względu ich bezpieczeństwo i niezawodność to kluczowe aspekty, ponieważ ewentualne uszkodzenie konstrukcji może prowadzić do poważnych konsekwencji, a w skrajnych przypadkach nawet do katastrofy ekologicznej. Celem niniejszego referatu jest przedstawienie wyników badań numerycznych obejmujących szereg analiz modalnych dla modelu rzeczywistego zbiornika zlokalizowanego na terenie Polski. Badania przeprowadzone zostały w środowisku Abaqus. Celem wykonanych analiz było wyznaczenie wartości dominujących częstotliwości drgań własnych oraz odpowiadających im postaci drgań przy różnym poziomie wypełnienia substancją magazynowaną (zbiornik pusty, częściowo wypełniony oraz zbiornik całkowicie wypełniony). Wyniki badań wskazują, iż zwiększanie poziomu wypełnienia powoduje gwałtowny spadek częstotliwości drgań własnych, co może mieć istotne znaczenie dla odporności dynamicznej zbiorników poddanych wstrząsom górniczym lub wymuszeniom sejsmicznym.

**Słowa kluczowe:** badania numeryczne, analiza modalna, stalowy zbiornik walcowy, dach stały.

### **1. Wstęp**

Stalowe zbiorniki walcowe są jednymi z najczęściej wykorzystywanych konstrukcji do magazynowania produktów przemysłu chemicznego i naftowego (zob. [1,2]). Każda awaria obiektu może prowadzić do znaczących strat materialnych, co wiąże się również z przerwami w użytkowaniu obiektu. Uszkodzenia mogą być w rezultacie bardzo niekorzystne i nieść za sobą poważne konsekwencje w postaci zanieczyszczenia środowiska naturalnego czy, w skrajnych przypadkach, spowodować katastrofę ekologiczną. Na bezpieczeństwo konstrukcji w istotny sposób wpływa również odporność na ekstremalne obciążenie dynamiczne, które związane są z takimi zjawiskami jak wstrząsy górnicze oraz trzęsienia ziemi [3]. Należy podkreślić fakt, że te oddziaływanie są jednymi z najmniej przewidywalnych, które mogą prowadzić do znaczących uszkodzeń zbiorników stalowych. Przy projektowaniu zbiorników na terenie Polski nie uwzględnia się obciążeń wyjątkowych związanych ze zjawiskami sejsmicznymi, a w zakresie zagadnień związanych ze wstrząsami górniczymi występują jedynie ogólne wytyczne projektowe [4,5]. Co prawda, trzęsienia ziemi nie są częstym zjawiskiem obserwowanym w naszym kraju, niemniej jednak mogą one prowadzić do poważnych uszkodzeń konstrukcji budowlanych. Przykładami, które można przytoczyć z najbliższej przeszłości są dwa trzęsienia ziemi z roku 2004 (północno-wschodnia Polska – 21.09.2004 [6], Podhale – 30.11.2004 [7]). W aspekcie wstrząsów górniczych należy wspomnieć o takich rejonach jak Legnicko-Głogowski Okręg Miedziowy, Górnośląskie Zagłębie Węglowe czy okolice kopalni Bełchatów, gdzie występuje intensywna eksploatacja górnicza. W tych częściach Polski

zjawiska te są częste i również mogą zagrażać bezpieczeństwu obiektów znajdujących się w zakresie ich wpływów [8].

Badania związane z oddziaływaniem trzęsień ziemi oraz wstrząsów górniczych na stalowe zbiorniki nie były w Polsce dotychczas intensywnie prowadzone. W dotychczasowej literaturze zajmującej się tego typu zagadnieniami swoją uwagę skupiono głównie na badaniach doświadczalnych (zob. np. [9,10]). Ze względu na trudności w prowadzeniu badań na obiektach rzeczywistych, analizy wykonane były na modelach doświadczalnych przy zastosowaniu stołu sejsmicznego. Testy, na podstawie których wyznaczone zostały parametry dynamiczne modeli zbiorników z dachem stałym wykazały, że zwiększenie poziomu wypełnienia obiektów powoduje gwałtowny spadek częstotliwości drgań własnych oraz znaczny wzrost wartości współczynników tłumienia drgań [9]. Inne badania eksperymentalne w tej tematyce dotyczyły odporności modeli na wstrząsy górnicze i trzęsienia ziemi [10]. W tym przypadku stwierdzono, że wzrost wypełnienia zbiornika prowadzi początkowo do spadku wartości ekstremalnych przyspieszeń, lecz po przekroczeniu pewnego poziomu cieczy ta prawidłowość uległa odwróceniu. Z drugiej strony, brak jest badań numerycznych potwierdzających wnioski wyciągnięte na podstawie testów wykonanych na stole sejsmicznym dla relatywnie małych modeli doświadczalnych.

Celem niniejszego referatu jest przedstawienie wyników badań numerycznych, które dotyczą odporności walcowych zbiorników stalowych na wstrząsy górnicze i trzęsienia ziemi mogące wystąpić w Polsce. Na tym etapie analizy skupiono się na określeniu wpływu poziomu wypełnienia substancją magazynowaną na wartość dominujących częstotliwości i odpowiadających im postaci drgań własnych rzeczywistego zbiornika. Badania przeprowadzone zostały dla modelu numerycznego konstrukcji z wykorzystaniem MES w środowisku Abaqus.

## 2. Model numeryczny

Przedmiotem badań przedstawionych w niniejszym referacie jest numeryczny model rzeczywistego zbiornika zlokalizowanego w północnej Polsce. Obiekt ten ma pojemność  $32.000 \text{ m}^3$ , a ponadto charakteryzuje się średnicą równą 50 m oraz całkowitą wysokością wynoszącą 23,33 m. Blacha dna zbiornika ma grubość 16 mm, natomiast grubość płaszcza zmienia się od 8 do 22 mm. Zbiornik wyposażony jest w dach stały, którego konstrukcja nośna składa się z następujących profili stalowych: IPE360 (elementy radialne), C100, C120, C140 (elementy obwodowe), L65x6, L80x8, L100x8 (elementy stężenia wiatrowego). Ponadto dach pokryty jest poszyciem w postaci blachy o grubości 5 mm. Zbiornik wykonany jest ze stali charakteryzującej się modułem Young'a  $E=210 \text{ GPa}$ , współczynnikiem Poisson'a  $\nu=0,3$  oraz gęstością  $\rho_s=7850 \text{ kg/m}^3$ .

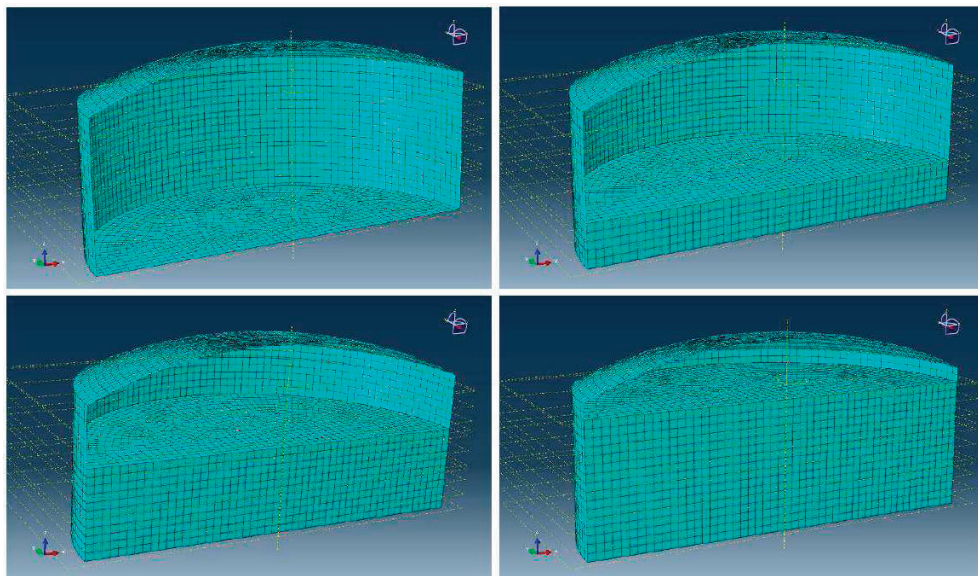
Do wygenerowania modelu MES zbiornika wykorzystano standardowe elementy występujące w środowisku Abaqus [11] w postaci 8-węzłowych elementów powłokowych typu QUAD (części stalowe zbiornika) oraz 20-węzłowych elementów bryłowych typu HEX (ciecz). Założono pełne utwierdzenie modelu zbiornika w podłożu gruntowym oraz uwzględniono interakcję pomiędzy płaszczem zbiornika a wypełniającą konstrukcję benzyną (zgodnie z faktycznym wykorzystaniem obiektu rzeczywistego) za pomocą powierzchni kontaktu (kontakt typu „hard” – zob. [12]). Zastosowany został model cieczy wg Virella'iego i innych [13]. Przeprowadzony został proces zagęszczania siatki, tak aby otrzymać optymalny podział układu na elementy skończone.

W przedstawionych badaniach rozpatrzono cztery warianty wypełnienia obiektu benzyną:

- 1) zbiornik pusty,
- 2) zbiornik wypełniony do 1/3 dopuszczalnej wysokości – 5,4 m słupa cieczy,
- 3) zbiornik wypełniony do 2/3 dopuszczalnej wysokości – 10,8 m słupa cieczy,
- 4) zbiornik wypełniony do poziomu dopuszczalnego wypełnienia – 16,2 m słupa cieczy.

Model numeryczny zbiornika pustego składał się z 9509 węzłów oraz 7366 elementów. W przypadku modelu zbiornika wypełnionego benzyną do 1/3 dopuszczalnej wysokości liczba węzłów wynosiła 28693, zaś liczba elementów 13361. Z kolei, model numeryczny zbiornika wypełnionego do 2/3 składał się z 68160 węzłów oraz 20555

elementów. Wreszcie, dla modelu zbiornika wypełnionego benzyną do poziomu dopuszczalnego wypełnienia liczba węzłów wynosiła 93125, a liczba elementów 26550. Model numeryczny zbiornika dla różnych wariantów wypełnienia przedstawiono na Rys 1.

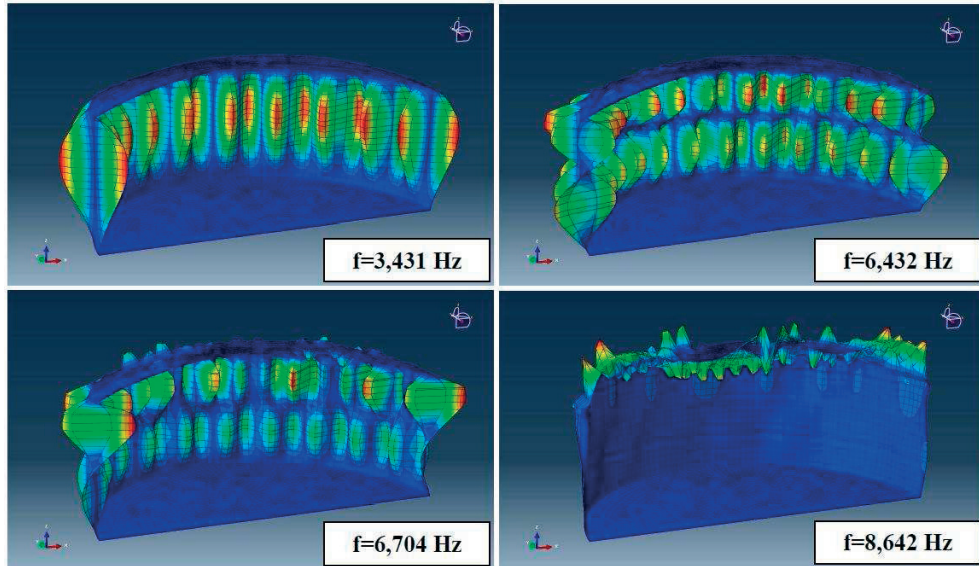


Rys. 1. Model numeryczny zbiornika – warianty wypełnienia substancją magazynowaną

### 3. Analiza modalna

Dla każdego z analizowanych przypadków wypełnienia zbiornika benzyną przeprowadzona została analiza modalna w celu wyznaczenia dominujących częstotliwości i odpowiadających im postaci drgań własnych układu konstrukcja-ciecz. Do wyznaczenia tych parametrów zastosowano metodę Lanczosa (zob. [14]).

W wyniku przeprowadzonych analiz modalnych dotyczących określenia podstawowych parametrów modelu numerycznego z zastosowaniem MES walcowego stalowego zbiornika otrzymano szereg częstotliwości i postaci drgań. Przykładowe rezultaty, uwzględniające falowanie wypełniającej zbiornik cieczy, zaprezentowane zostały na Rys. 2-5. Wyniki te pokazują, iż w przypadku zbiornika pustego (zob. Rys. 2), pierwsze trzy postacie drgań własnych dotyczą drgań płaszcza zbiornika, zaś kolejna, czwarta forma obejmuje drania dachu konstrukcji. Zupełnie inna sytuacja ma miejsce, gdy model zbiornika wypełniono cieczą (zob. Rys. 3-5). W przypadkach tych, kolejne postacie drgań własnych wyraźnie wskazują na dominujące działanie związane z falowaniem benzyny oraz pokazują interakcję pomiędzy konstrukcją a wypełniającą ją cieczą. Wyniki przedstawione na Rys. 2-5 pokazują ponadto jednoznacznie, że wzrost poziomu wypełnienia prowadzi do znaczącego spadku wartości częstotliwości drgań własnych konstrukcji. Porównując wyniki dla czterech przypadków wypełnienia można zauważyć, że w przypadku pierwszej dominującej częstotliwości drgań własnych, wartość tego parametru zmniejsza się o 64,7%, 79,5% oraz 83,8% poprzez wzrost wypełnienia cieczą odpowiednio do 5,4 m, 10,8 m oraz do 16,2 m (maksymalne dopuszczalne wypełnienie zbiornika). Z kolei, dla drugiej częstotliwości spadek wynosił odpowiednio 79,3%, 86,1%, 88,5% w analogicznych przypadkach obliczeniowych. Podobne wyniki uzyskano dla trzeciej i czwartej częstotliwości drgań własnych, dla których spadek wyniósł odpowiednio 78,2%, 84,1%, 87,7% oraz 81,4%, 87,3%, 90,4% przy zwiększaniu wypełnienia substancją magazynowaną.



Rys. 2. Dominujące postacie drgań własnych – zbiornik pusty

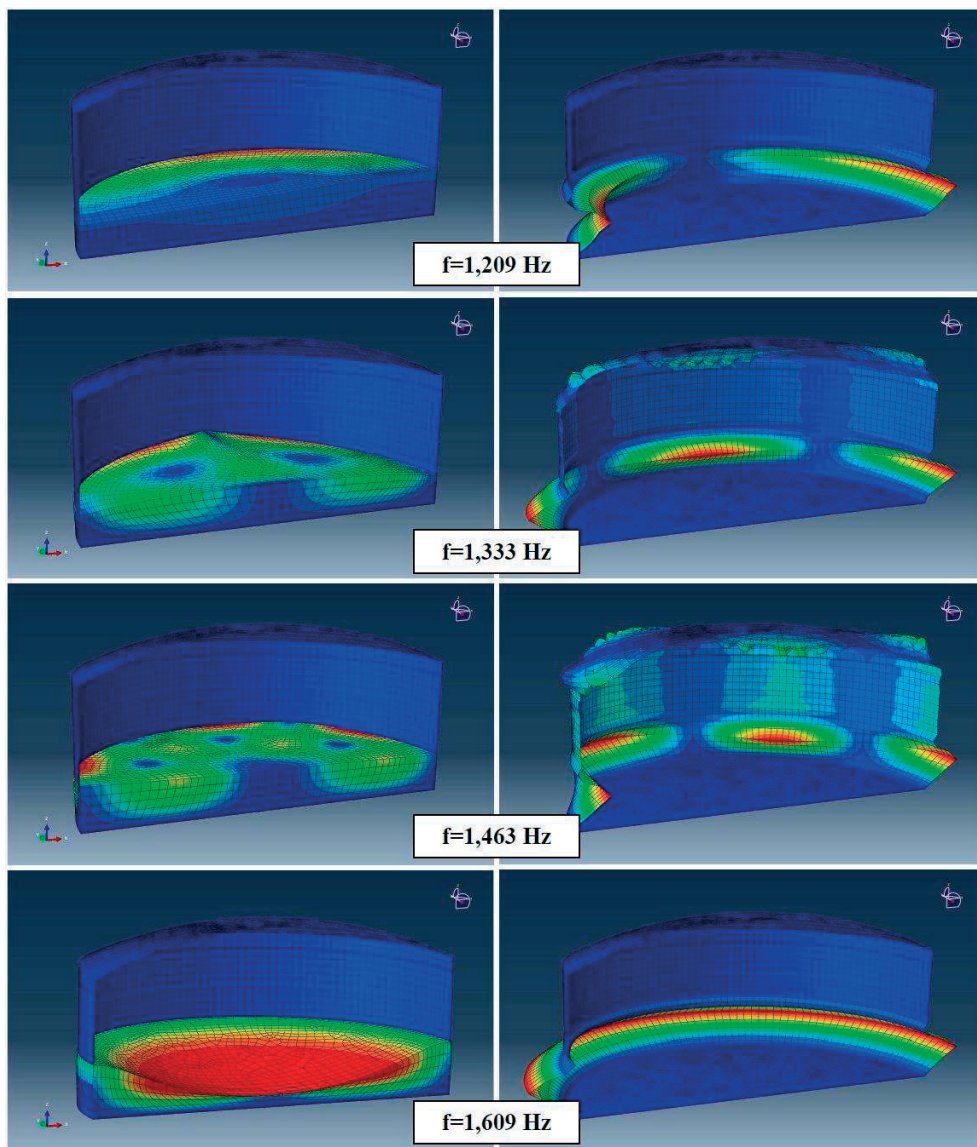
#### 4. Wnioski

W niniejszym referacie przedstawiono wyniki analiz modalnych przeprowadzonych dla modelu numerycznego zbiornika stalowego z dachem stałym przy różnym poziomie wypełnienia substancją magazynowaną (benzyną). Wyniki badań jednoznacznie wskazują, iż poziom wypełnienia ma zasadniczy wpływ na parametry dynamiczne analizowanego zbiornika. Zwiększenie poziomu wypełnienia skutkuje znacznym spadkiem wartości częstotliwości drgań własnych, co jest istotnym aspektem z punktu widzenia odporności dynamicznej tego typu obiektów budowlanych poddanych takim oddziaływaniom jak wstrząsy górnicze czy sejsmiczne. Otrzymane wyniki w pełni potwierdzają rezultaty uzyskane na podstawie badań eksperymentalnych wykonanych na stole sejsmicznym dla zeskalowanego modelu doświadczalnego zbiornika (por. [9]).

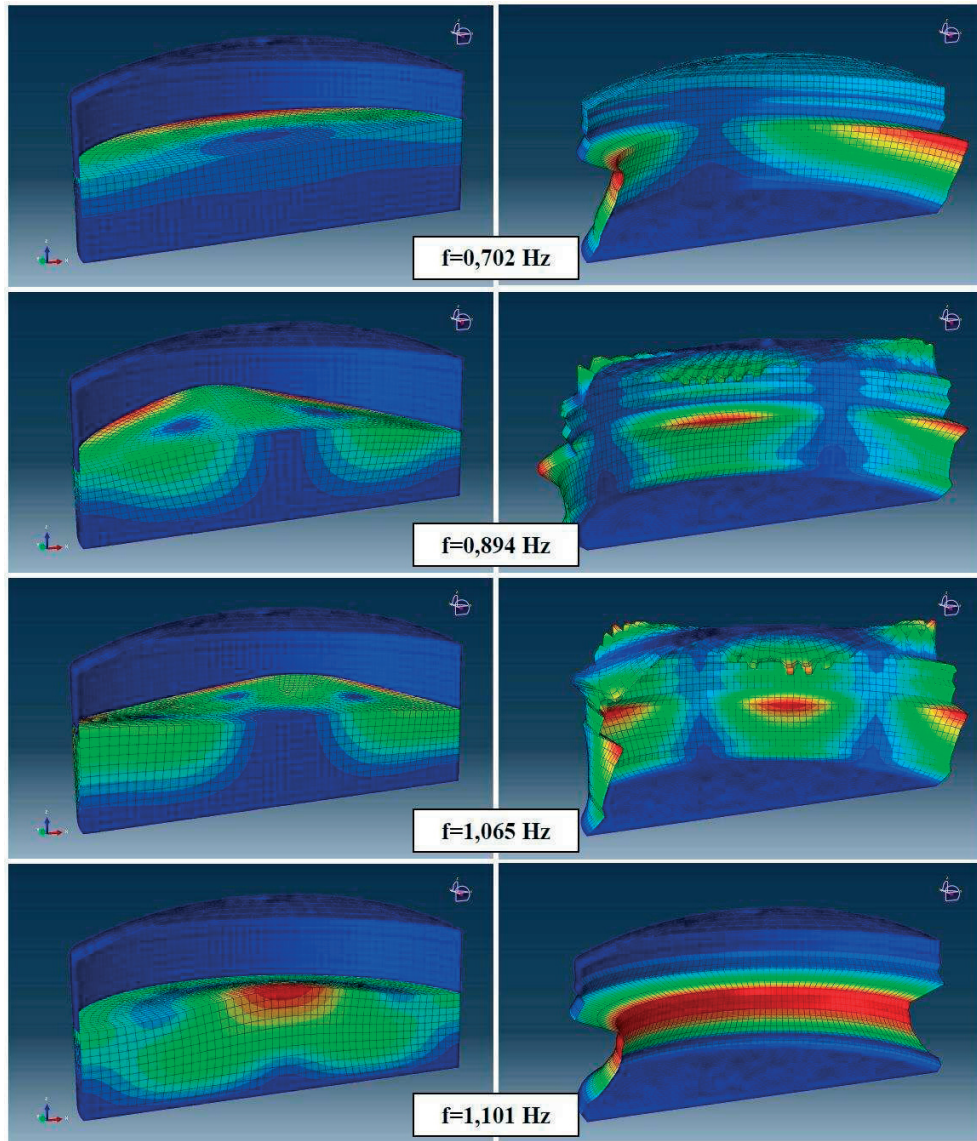
W kolejnym etapie badań planowane jest przeprowadzenie kompleksowej analizy numerycznej modeli zbiorników z wykorzystaniem MES poddanych wymuszeniom dynamicznym w postaci wstrząsów górniczych oraz trzęsień ziemi, które mogą wystąpić na terenie Polski.

#### Podziękowania

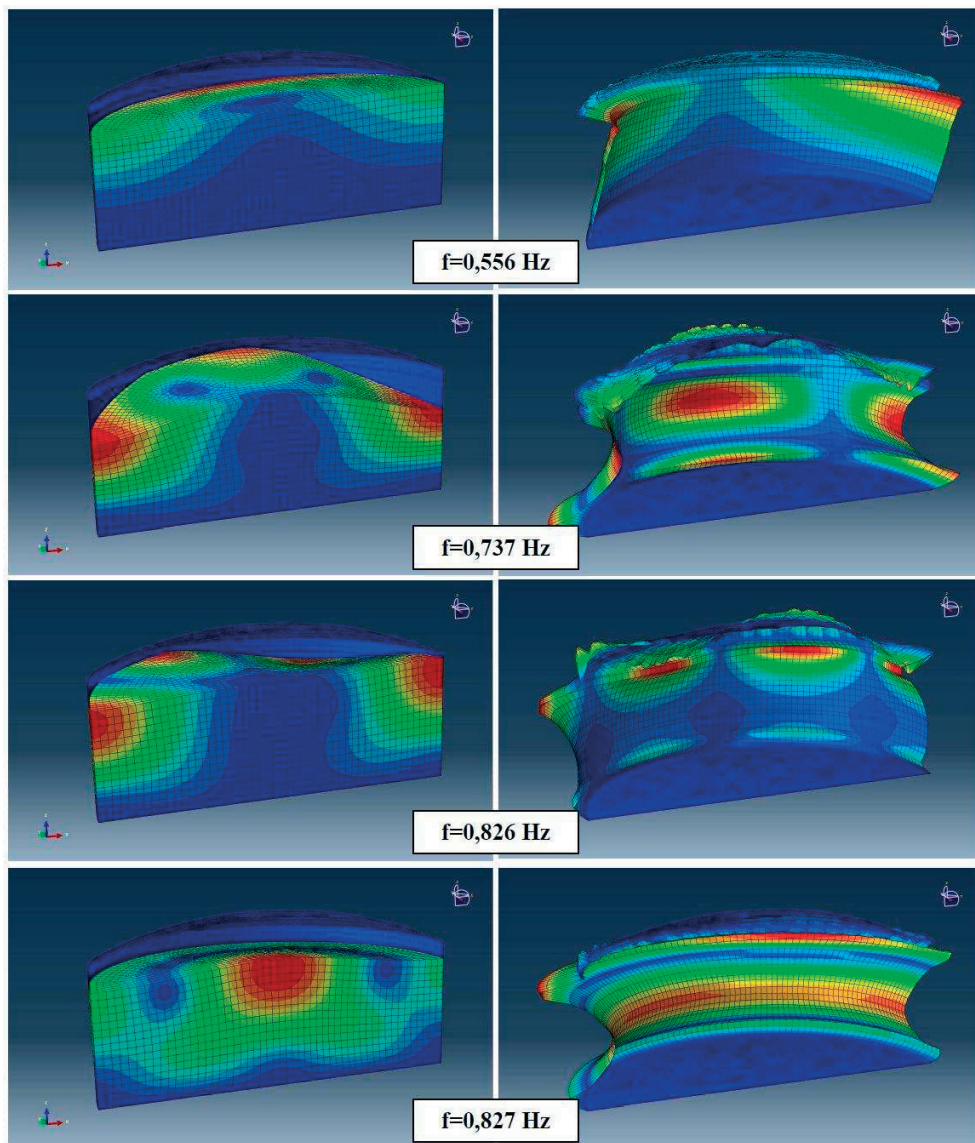
Praca naukowa finansowana ze środków Narodowego Centrum Nauki jako projekt badawczy nr N N506 121240. Autorzy pragną wyrazić swoje podziękowanie panu prof. Jerzemu Ziółko oraz panu dr. Aleksandrowi Perlińskiemu za wszelkie uwagi i sugestie dotyczące numerycznego modelowania zbiorników stalowych.



Rys. 3. Dominujące postacie drgań własnych – zbiornik wypełniony benzyną do wysokości 5,4 m (lewa strona: falowanie cieczy, prawa strona: drgania zbiornika)



Rys. 4. Dominujące postaci drgań własnych – zbiornik wypełniony benzyną do wysokości 10,8 m (lewa strona: falowanie cieczy, prawa strona: drgania zbiornika)



Rys. 5. Dominujące postacie drgań własnych – zbiornik wypełniony benzyną do wysokości 16,2 m (lewa strona: falowanie cieczy, prawa strona: drgania zbiornika)

## Literatura

- 1 Ziółko J. Zbiorniki metalowe na ciecze i gazy. Arkady, Warszawa, 1986.
- 2 Magnucki K. Wytrzymałość i optymalizacja zbiorników cienkościennych. PWN, Warszawa, 1998.
- 3 De Angelis M., Giannini R., Paolacci F. Experimental investigation on the seismic response of a steel liquid storage tank equipped with floating roof by shaking table tests. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 39 (2010) 377-396.
- 4 Instrukcja ITB 364/2007: Wymagania techniczne dla obiektów budowlanych wznoszonych na terenach górniczych. Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa, 2007.

- 5 Kwiatek J. (red.) Ochrona obiektów budowlanych na terenach górniczych. Wydawnictwo Głównego Instytutu Górnictwa, Katowice, 1997.
- 6 Zembaty Z., Cholewicki A., Jankowski R., Szulc J. Trzęsienia ziemi 21 września 2004 r. w Polsce północno-wschodniej oraz ich wpływ na obiekty budowlane. Inżynieria i Budownictwo 1 (2005) 3-9.
- 7 Zembaty Z., Jankowski R., Cholewicki A., Szulc J. Trzęsienie ziemi 30 listopada 2004 r. na Podhalu oraz jego wpływ na obiekty budowlane. Inżynieria i Budownictwo 9 (2005) 507-511.
- 8 Tatara T. Odporność dynamiczna obiektów budowlanych w warunkach wstrząsów górniczych. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2012.
- 9 Burkacki D., Jankowski R. Badania eksperymentalne parametrów dynamicznych modeli zbiorników stalowych na stole sejsmicznym. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej 59 (2012) 341-348.
- 10 Burkacki D., Jankowski R. Badania eksperymentalne modelu zbiornika stalowego poddanego wstrząsem górniczym i sejsmicznym. XIII Sympozjum „Wpływy Sejsmiczne i Parasejsmiczne na Budowle” [CD-ROM], s.1-15, Kraków, 22-23 Listopad 2012.
- 11 ABAQUS/CAE version 6.11 User’s Manual. Dassault Systèmes, 2011.
- 12 Virella J.C., Prato C.A., Godoy L.A. Linear and nonlinear 2D finite elements analysis of sloshing modes and pressures in rectangular tanks subject to horizontal harmonic motions. Journal of Sound and Vibration 312 (2008) 442-460.
- 13 Virella J.C., Godoy L.A., Suárez L.E., Mander J.B. Influence of the roof on the natural periods of empty steel tanks. Engineering Structures 25 (2003) 877-887.
- 14 Chopra A.K. Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, USA, 1995.

## The modal analysis of cylindrical steel tank with self-supported roof filled with different level of liquid

Daniel Burkacki<sup>1</sup>, Michał Wójcik<sup>2</sup>, Robert Jankowski<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Metal Structures and Construction Management, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Gdansk University of Technology, e-mail: daniel.burkacki@op.pl

<sup>2</sup> Department of Building and Material Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Gdansk University of Technology, e-mail: mwojcik@pg.gda.pl

<sup>3</sup> Department of Metal Structures and Construction Management, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Gdansk University of Technology, e-mail: jankowr@pg.gda.pl

**Abstract:** In technical branches, such as chemical or petroleum industries, cylindrical steel tanks are essential structures used for storage of liquid products. Therefore, their safety and reliability is essential, because any failure might have dangerous consequences, in extreme cases may even lead to an environmental disaster. The aim of the presented paper is to show the results of the modal analysis concerning the cylindrical steel tank with self-supported roof which has been constructed in northern Poland. The investigation was carried out with the use of the FEM commercial computer program Abaqus. The values of natural frequencies, as well as the natural modes, for different levels of liquid filling (empty tank, partly filled and tank fully filled) were determined in the study. The results of the study clearly indicate that the increase in the liquid level leads to the substantial decrease in the natural frequencies of the structure.

**Keywords:** numerical study, modal analysis, cylindrical steel tank, self-supported roof.