

Bogdan Szturomski
Akademia Marynarki Wojennej

**ANALIZA WPLYWU
GEOMETRII ELEMENTÓW KONSTRUKCYJNYCH
I OBCIĄŻEŃ EKSPLOATACYJNYCH
NA STAN WYTEŻENIA POSZYCIA STALOWEGO
CIENKOŚCIENNEGO WIELKOGABARYTOWEGO
ZBIORNIKA**

STRESZCZENIE

Obiektami badań w pracy są wielkogabarytowe cienkościenne zbiorniki stalowe przeznaczone na zamknięte komory fermentacyjne (ZKF), należące do powszechnie stosowanych urządzeń w polskich oczyszczalniach ścieków. ZKF-y służą do odzyskiwania biogazu (metanu) w procesie fermentacji ścieków komunalnych. W obiektach tych po wieloletniej pracy stwierdza się utratę szczelności, wskutek korozji poszycia i pęknięć w charakterystycznych miejscach. Celem artykułu jest wskazanie przyczyn pęknięcia poszycia zbiorników na podstawie wizji lokalnej oraz symulacji numerycznych stanów naprężenia i deformacji odzwierciedlających rzeczywiste warunki, w jakich pracowały ZKF-y. Na ich podstawie wyłoniono ekstremalne, niebezpieczne dla ZKF-ów warunki pracy, zalecono metody i technologie naprawcze, monitoring oraz warunki dalszej bezpiecznej eksploatacji. Zamieszczono wybrane wyniki stanów naprężenia i deformacji powstające w konstrukcji ZKF-ów dla danych warunków obciążenia.

Słowa kluczowe:

zamknięte komory fermentacyjne, biogaz, obciążenia cieplne, analiza stanu naprężenia, MES, CAD, CAE, Autodesk Inventor, Abaqus.

WSTĘP

Członkostwo Polski w Unii Europejskiej wymusza na naszym przemyśle poszukiwanie nowych źródeł energii w związku z koniecznością ograniczenia emisji CO₂ do atmosfery. Liczne programy unijne objęły modernizację miejskich oczyszczalni

ścieków komunalnych, w których pojawiły się zamknięte komory fermentacyjne (rys. 1.) służące do odzyskiwania biogazu jako paliwa wykorzystywanego w kotłowniach gazowych. ZKF-y to stalowe zbiorniki o walcowym kształcie, średnicy od kilkunastu do trzydziestu metrów i wysokości do dwudziestu metrów. Ze względu na proces fermentacji i konieczność utrzymania temperatury na zadanym poziomie są ocieplane, najczęściej wełną mineralną.



Fot. 1. Zbiornik ZKF w oczyszczalni ścieków
Źródło: zdjęcie wykonane przez autora.



Fot. 2. Poszycie ZKF-u z blach
Źródło: zdjęcie wykonane przez autora.

W zbiorniku takim zachodzi fermentacja ścieków, z których wydziela się metan, wytwarzając nad lustrem cieczy niewielkie nadciśnienie o wartości 3 kPa. Metan jest wybuchowym gazem, więc zbiornik i jego otoczenie stanowi strefę zagrożenia. W trakcie pracy ZKF-y w dziewięćdziesięciu procentach objętości są wypełnione ściekami i jednorazowo może znajdować się w jednym ponad dziesięć tysięcy metrów sześciennych ścieków, co stanowi duże zagrożenie ekologiczne w przypadku rozszczelnienia się takiego obiektu. Dlatego ZKF-y muszą spełniać odpowiednie wymagania, przede wszystkim w zakresie gazoszczelności. Obiekty te są pod ciągłą kontrolą, a okresowo wykonuje się przeglądy stanu poszycia.

W polskich oczyszczalniach ścieków role ZKF-ów spełniają zbiorniki skręcane ze stalowych arkuszy blach w tzw. cargii (rys. 2.). Składają się one z trzech zasadniczych części: betonowego fundamentu od wewnątrz w kształcie stożka, stalowej części walcowej i stożkowego dachu. Zaletą tego typu zbiorników jest prosty montaż i niska cena. Są one powszechnie stosowane jako obiekty magazynowe cieczy oraz substancji sypkich, na przykład kruszywa, cementu, zboża itp. Niestety, wybór takiej konstrukcji, zawierającej kilometry połączeń blach uszczelnionych elastycznym kitem, na ZKF-y ze względu na wymóg gazoszczelności nie jest zbyt

trafny. Ponadto ścieki to substancje różnego pochodzenia, chemicznie aktywne, dla stali stanowiące niekorzystne, agresywne i korozyjne środowisko.

SFORMUŁOWANIE PROBLEMU

Wieloletnia eksploatacja zbiorników wykazała problemy w utrzymaniu gazo szczelności. Zbiorniki przedstawionego typu, pracujące jako ZKF-y, wskutek miejscowej korozji występującej w charakterystyczny obszarach, tj. łączenia się części walcowej ze stożkowym dachem, ulegają pękaniu. Pęknięcia te to pionowe szczeliny długości do 20 cm, niepropagujące się na dalsze części poszycia (rys. 3.). Nie stanowią one zagrożenia dla nośności konstrukcji zbiornika jako całości, jednak ucieka przez nie cenny gaz, grożąc zarazem wybuchem. Usunięcie ognisk korozji i przywrócenie szczelności zbiornika nie stanowi poważnego problemu technicznego, jest raczej kwestią kosztów i przestoju zbiornika, natomiast w celu zapobiegania powstawania nowych pęknięć niezbędna jest znajomość mechanizmu ich powstawania.



Fot. 3. Wżery korozyjne i pęknięcia w poszyciu ZKF

Źródło: zdjęcie wykonane przez autora.

Do oceny powstawania pęknięć wykonano symulacje stanów naprężenia i deformacji odzwierciedlających rzeczywiste warunki, w jakich pracowały ZKF-y. Po zapoznaniu się z dokumentacją, budową i przeznaczeniem zbiorników oraz sposobem ich eksploatacji założono przyczyny powstających pęknięć. Za podstawowe obciążenia działające na zbiornik uznano:

- ciężar własny;
- ciśnienie hydrostatyczne ścieków i nadciśnienie gazu.
- ciśnienie wiatru;
- różnica temperatur w elementach konstrukcji zbiornika;
- uderzenie hydrauliczne (przepełnienie zbiornika).

Geometria obiektu ma decydujący wpływ na rozkłady stanów naprężeń w konstrukcji i budzi duże wątpliwości ze względu na zamknięcie części walcowej stożkowym dachem, czego nie praktykuje się w zbiornikach pracujących pod ciśnieniem. W geometrii zbiornika występuje karb, który został wzmocniony ceownikami o dużej sztywności, przytwierdzonymi do wiotkiego poszycia wykonanego z cienkiej blachy. Ceowniki C300 grubości 10 mm skręcone są płaskimi blachami i stanowią sztywną obejmę, do której przykręcone jest poszycie dachu z blach grubości 7 mm oraz cienkie poszycie części walcowej z blach grubości 4 mm. W konstrukcji tej ewidentnie zostały zaburzone proporcje sztywności współpracujących elementów, co należy zaliczyć do błędów projektowych lub konstrukcyjnych.



Fot. 4. Łączenie części walcowej i stożkowej ceownikami C 300

Źródło: zdjęcie wykonane przez autora.

SYMULACJE STANU NAPRĘŻENIA W POSZYCIU ZBIORNIKA

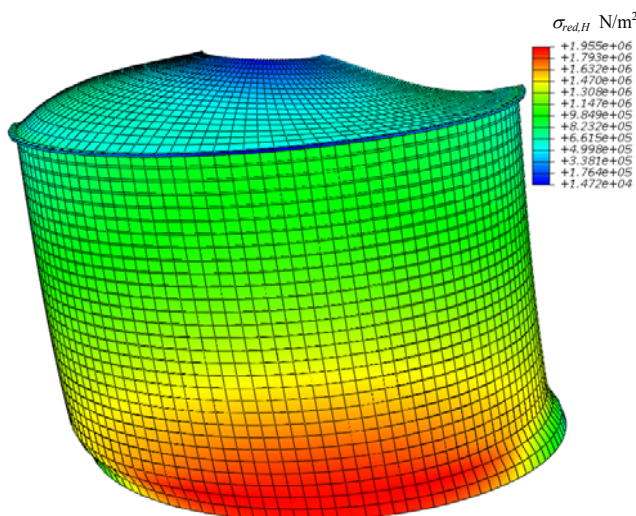
Stany naprężenia wywołane powyższymi obciążeniami symulowano w programie Abakus [4, 6]. Geometrię zbiorników do obliczeń w różnym stopniu uproszczenia odzwierciedlono w programie Autodesk Inventor [3]. Poniżej przedstawiono wybrane symulacje stanów naprężenia zredukowanego Hubera.

Zbiorniki ZKF posadowione na otwartych przestrzeniach, szczególnie na wybrzeżu, kilka razy w roku narażone są na działanie huraganów o prędkości wiatru

około 120 km/h (33,3 m/s). Gęstość powietrza, zależną od ciśnienia atmosferycznego, wilgotności i temperatury, przyjęto dla ekstremalnych warunków. Przy ciśnieniu $p_{atm} = 100$ kPa i temperaturze $\theta = -25$ °C wynosi ona około $\rho = 1.4$ kg/m³. Ciśnienie spiętrzenia dla tak przyjętych założeń wynosi [2]:

$$p_{wiatr} = \frac{\rho_{powietrza} \cdot v^2}{2} = \frac{1,4 \cdot (33,333)^2}{2} = 777,7 \text{ N/m}^2$$

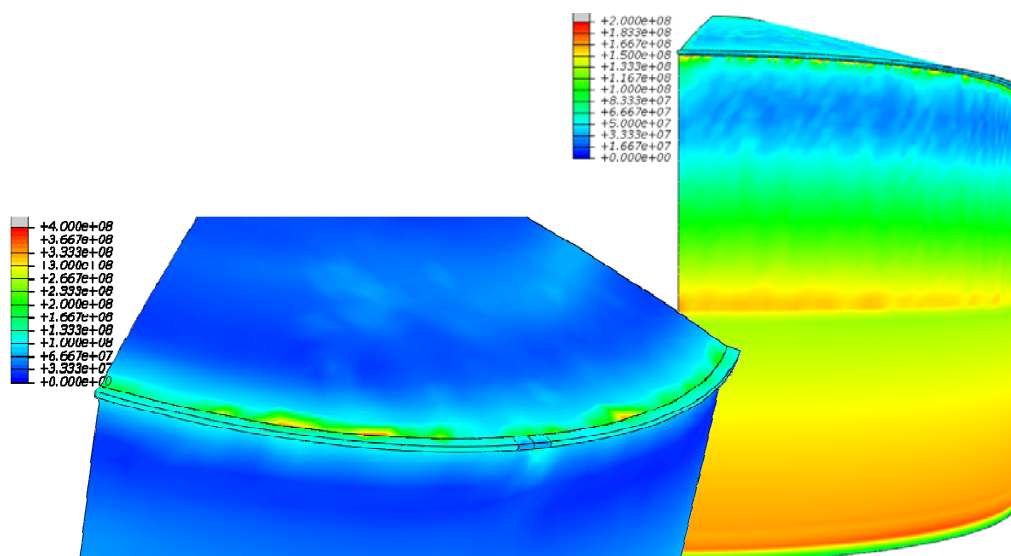
Wartość tego ciśnienia jest stosunkowo niewielka. Jego kierunek zrzutowano na kierunek normalny do elementów. Naprężenia zredukowane według hipotezy dla zbiornika obciążonego ciśnieniem hydrodynamicznym wiatru są poniżej 2 MPa i występują w posadowieniu zbiornika (Rys. 1). Nie stanowią żadnego zagrożenia dla zbiornika.



Rys. 1. Rozkład naprężeń $\sigma_{red,H}$ wywołany ciśnieniem wiatru

Źródło: opracowanie własne.

W przypadku przepelnienia zbiornika cieczą nastąpi wzrost ciśnienia napierającego na ściany zbiornika, łącznie z dachem. Zbiornik jest wyposażony w urządzenia uniemożliwiające przepelnienie zbiornika, jednak takie przypadki odnotowano wskutek awarii urządzeń zabezpieczających lub czynnika ludzkiego. Należy również przewidzieć wzrost ciśnienia gazu nad lustrem cieczy z innych przyczyn. W symulacji poniżej przyjęto wzrost ciśnienia zaledwie o 10 kPa, co odpowiada 1 m wysokości słupa wody.



Rys. 2. Rozkład naprężeń $\sigma_{red,H}$ wywołany wzrostem ciśnienia o 10 kPa

Źródło: opracowanie własne.

Otrzymane wyniki jednoznacznie wskazują, że najsłabszym punktem konstrukcyjnym zbiornika jest obszar połączenia części walcowego poszycia ze stożkowym dachem. Według uproszczonej teorii błonowej powłok na stan naprężania w powłokach cienkościennych mają wpływ promienie krzywizny [1]:

$$\frac{\sigma_1}{\rho_1} + \frac{\sigma_2}{\rho_2} = \frac{p}{g}$$

Przykładowo dla zbiornika walcowego o średnicy D , grubości g , w którym ciśnienie gazu wynosi p , przy założeniu, że naprężenia osiowe i obwodowe są różne $\sigma_1 \neq \sigma_2$, promienie krzywizny wynoszą:

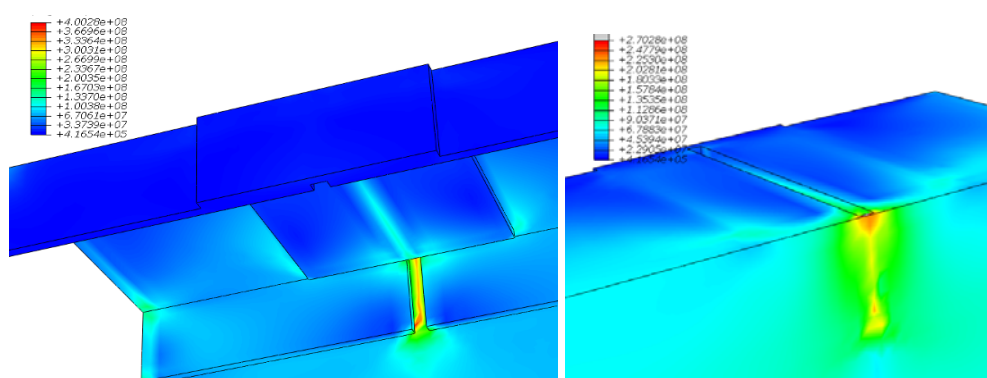
$$\rho_1 = \frac{D}{2} \quad \rho_2 = \infty,$$

a wartości naprężeń wyrażają się wzorami:

$$\sigma_1 = \frac{pD}{2g} \quad \sigma_2 = \frac{pD}{4g}.$$

Według tej teorii dla konstrukcji ZKF-ów miejsce połączenia części walcowego poszycia ze stożkowym dachem stanowi osobliwość, gdzie promienie krzywizny gwałtownie się zmieniają i są nieokreślone, co w rzeczywistości skutkuje koncentracją naprężeń. W powyższym zadaniu dla przyjętych modeli obliczeniowych naprężenia te osiągają wartość 400 MPa, jednak w rzeczywistym zbiorniku mogą być niższe.

Fermentująca ciecz w zbiorniku osiąga temperaturę około 30 stopni, a niektóre jego elementy w sąsiedztwie powstałych pęknięć mają kontakt bezpośrednio z otoczeniem. Takim elementem jest usztywniający ceownik, którego zewnętrzna powierzchnia ma temperaturę otoczenia. W warunkach zimowych przy temperaturze $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ różnica temperatur może osiągnąć $\Delta\theta = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ i więcej. Poniżej przeprowadzono symulację stanu naprężenia w zbiorniku, koncentrując uwagę na obszarze połączenia części walcowego poszycia ze stożkowym dachem dla różnicy temperatur $\Delta\theta = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Rys. 3. Rozkład naprężeń $\sigma_{red,H}$ w obrębie ceownika usztywniającego wywołany różnicą temperatur $\Delta\theta = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, widok od zewnątrz i wewnątrz

Źródło: opracowanie własne.

Naprężenia zredukowane według hipotezy Hubera w obrębie ceownika usztywniającego zbiornik wywołane różnicą temperatur $\Delta\theta = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ lokalnie na poszyciu wzdłuż dylatacji ceowników osiągają wartości rzędu 400 MPa. Długość pierścienia wykonana z ceowników wynosi:

$$L_{Obwód} = \pi \cdot d = 3,14159 \cdot 22,2 = 69,74\text{ m}$$

Całkowite skrócenie obwodu tego pierścienia, przy założeniu, że byłby on swobodny dla współczynnika liniowej rozszerzalności termicznej $\alpha = 12 \cdot 10^{-6}$, wynosi [4]:

$$\begin{aligned} \text{dla } \Delta\theta = 30 \text{ K} \quad \Delta l &= \alpha \cdot \Delta\theta \cdot L_{\text{Obwód}} = \\ &12 \cdot 10^{-6} \cdot 30 \cdot 69,7 = 0,025092 \text{ m} = 25 \text{ mm} \\ \text{dla } \Delta\theta = 40 \text{ K} \quad \Delta l &= \alpha \cdot \Delta\theta \cdot L_{\text{Obwód}} = \\ &12 \cdot 10^{-6} \cdot 40 \cdot 69,7 = 0,033456 \text{ m} = 33 \text{ mm} \\ \text{dla } \Delta\theta = 50 \text{ K} \quad \Delta l &= \alpha \cdot \Delta\theta \cdot L_{\text{Obwód}} = \\ &12 \cdot 10^{-6} \cdot 50 \cdot 69,7 = 0,041820 \text{ m} = 41 \text{ mm} \end{aligned}$$

W zbiorniku pierścien ten nie ma możliwości swobodnego skrócenia się, ponieważ zaciska się on na walcowym poszyciu, zgniatając je i indukując niebezpieczne stany naprężenia. W rzeczywistości naprężenia te będą niższe, gdyż zbiornik jest skręcany z arkuszy blach, które mają pewną możliwość przesuwu między sobą, jednakże koncentracje naprężeń wystąpią we wskazanych miejscach, a osłabione rozwijającą się korozją ulegną pęknięciu.

W ociepleniu zbiorników jest wiele błędów, występuje w nim wiele mostków termicznych i to w geometrycznie „słabych” elementach zbiornika, co jest przyczyną powstawania niekorzystnych rozkładów naprężeń cieplnych. Poza ceownikiem, którego zewnętrzna powierzchnia ma kontakt z otoczeniem, miejscem, w którym różnice temperatur mogą być przyczyną pęknięć, jest dach wzmocniony promieniowo profilami stalowymi o kształcie \square z blachy. Ocieplenie jest ułożone pomiędzy wzmocnieniami (fot. 5.), natomiast górna część profilu ma temperaturę otoczenia i w warunkach zimowych będzie zginała poszycie dachu. Ze względu na większą grubość dachu i w tym przypadku zachowanie proporcji sztywności w odniesieniu do profili usztywniających, wartości naprężeń cieplnych wynoszą około 60 MPa, przy różnicy temperatur $\Delta\theta = 30 \text{ }^\circ\text{C}$, i występują w profilu wzmocniającym (rys. 4.), a nie w poszyciu dachu. Przy różnicy temperatur $\Delta\theta = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ wzrastają do około 100 MPa w profilach wzmocniających, a w poszyciu osiągają wartości rzędu 20 MPa. Te pozornie małe wartości za względu na liniowe koncentracje mogą być przyczyną korozji i wzrastać wraz z ubytkiem materiału.

Bezpośrednią przyczyną występowania koncentracji naprężeń w okolicy połączenia części walcowej ze stożkowym dachem jest geometria zbiornika. W zbiornikach pracujących pod ciśnieniem nawet o stosunkowo niewielkich wartościach w miejscu zamknięcia walcowej części unika się ostrych karbów, tj. gwałtownych zmian promienia krzywizny, stosując przykrycia kuliste i eliptyczne (rys. 5.), unika się również płaskich powierzchni.



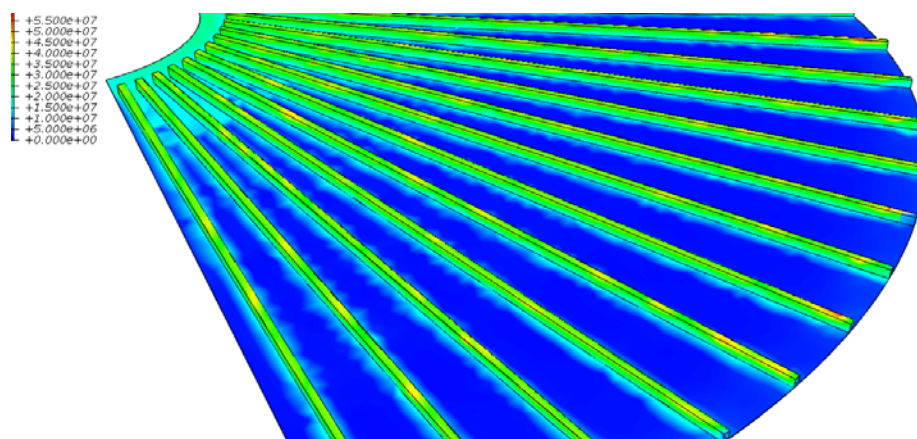
Fot. 5. Wzmocnienie stożkowego dachu i ocieplenie wełną mineralną

Źródło: zdjęcie wykonane przez autora.



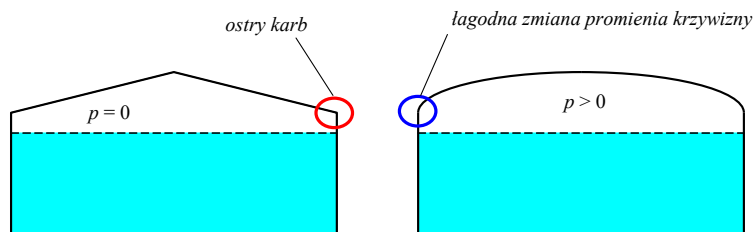
Fot. 6. Widok dachu pracującego zbiornika po opadach śniegu, temperatura $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$

Źródło: zdjęcie wykonane przez autora.



Rys. 4. Rozkład naprężeń $\sigma_{red,H}$ w dachu wywołany różnicą temperatur $\Delta\theta = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$

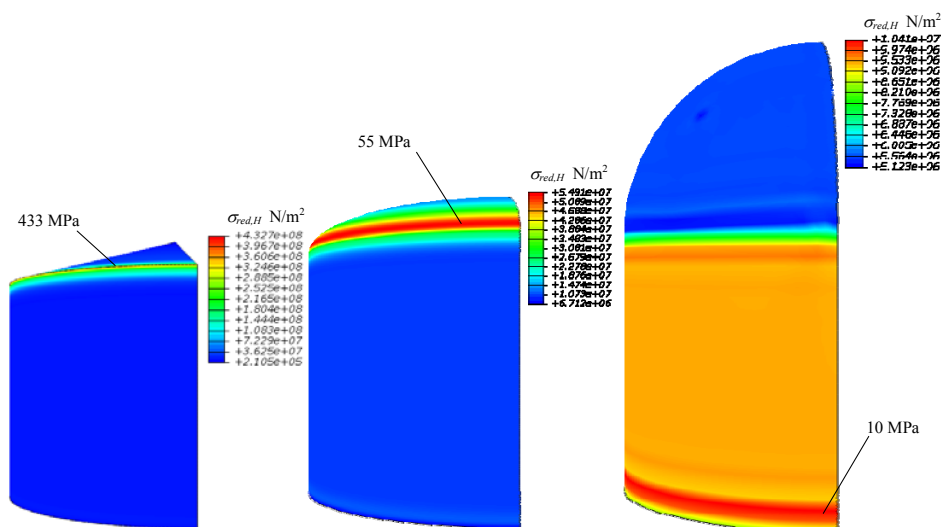
Źródło: opracowanie własne.



Rys. 5. Zamknięcie zbiornika walcowego

Źródło: opracowanie własne.

Poniżej przedstawiono trzy przykładowe symulacje dla podobnych zbiorników stalowych o walcowej konstrukcji i wymiarach zbliżonych do ZKF-ów, tj. średnicy 22 m, wysokości 14 m, stałej grubości poszycia 10 mm, obciążonych od wewnątrz ciśnieniem $p = 10$ kPa, zamkniętych dachem stożkowym, eliptycznym i kulistym bez wzmocnienia połączenia. Ciśnienie to w części walcowej, przy średnicy 22 m, wywołuje naprężenia rzędu 10 MPa. W przypadku zbiornika zamkniętego dachem kulistym maksymalne naprężenia zredukowane Hubera wynoszą właśnie 10 MPa i są zlokalizowane w podstawie zbiornika, dla zbiornika z dachem eliptycznym wynoszą one już 55 MPa i występują w łączeniu obu części, a dla dachu stożkowego w tym samym miejscu osiągają wartość 433 MPa (wytrzymałość zwykłej stali to około 300 MPa). Istotny jest również gradient zmian naprężeń, co ma wpływ na różnicę potencjałów elektrycznych i rozwój korozji elektrochemicznej. Należy tu zwrócić uwagę, że ciśnienie 10 kPa to zaledwie takie, jakie wywiera słup wody wysokości 1 m H₂O.



Rys. 6. Wpływ kształtu zamknięcia zbiornika walcowego na rozkład naprężeń zredukowanych Hubera (obciążenie ciśnieniem $p = 10$ kPa)

Źródło: opracowanie własne.

WNIOSKI Z OBLICZEŃ

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń stwierdzono, że przyczynami pęknięć zbiornika w jego górnej części, w obszarze połączenia walcowego poszycia z dachem pierwotnie były błędy konstrukcyjne, takie jak gwałtowna zmiana promienia krzywizny w połączeniu części walcowej ze stożkową oraz ewidentne zaburzenie proporcji sztywności współpracujących elementów poprzez połączenie wiotkiego poszycia zbiornika z cienkiej blachy z pierścieniem usztywniającym wykonanym z ceowników o dużej sztywności. Ponadto źle zaprojektowane ocieplenie z mostkami cieplnymi jest przyczyną koncentracji naprężeń cieplnych, które przekraczają granicę plastyczności. Powstałe koncentracje naprężeń są źródłami korozji elektrochemicznej, wskutek której następuje ubytek materiału prowadzący do dalszego narastania naprężeń, aż do przekroczenia granicy wytrzymałości. Przyczyną niezależną od powyższych i nakładającą się na nie mogły być również niekontrolowane wzrosty ciśnienia wywołane przepelnieniem zbiornika.

Dysponując wiedzą o stanach naprężenia w konstrukcji zbiorników pozyskaną z symulacji numerycznych, wyłoniono ekstremalne, niebezpieczne dla ZKF-ów warunki pracy, zalecono metody i technologie naprawcze, monitoring oraz warunki dalszej bezpiecznej eksploatacji.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Dyląg Z., Jakubowicz A., Orłoś Z., *Wytrzymałość materiałów*, t. 1, WNT, Warszawa 2007.
- [2] Gryboś R., *Podstawy mechaniki płynów*, PWN, Warszawa 1989.
- [3] Jaskulski A., *Autodesk Inventor 2010PL/2010*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2009.
- [4] Niezgodziński M. E., Niezgodziński T., *Wytrzymałość materiałów*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2009.
- [5] Skrzat A., *Modelowanie liniowych i nieliniowych problemów mechaniki ciała stałego i przepływów ciepła w programie ABAQUS*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2010.
- [6] Szturomski B., *Podstawy metody elementów skończonych*, Wydawnictwo Akademickie AMW, Gdynia 2011.

ANALYSIS OF EFFECT OF CONSTRUCTION ELEMENT GEOMETRY AND OPERATING LOADS ON EFFORT OF STEEL PLATING IN THIN-WALLED HIGH-DIMENSIONAL TANK

ABSTRACT

The objects of investigations are high-dimensional thin-walled steel tanks built as closed fermentation chambers, which are commonly used in Polish sewage treatment plants. They are used to recover bio-gas (methane) in the fermentation process of communal sewage. Loss of tightness is recorded in such objects, following many years of work, due to corrosion of plating and cracks in characteristic places. The aim of the paper is to identify the causes of cracks in plating of tanks on the basis of visit to the scene and numerical simulation of tensions and deformations reflecting the real conditions under which they have been working. They are used to discover extreme, dangerous for the chambers work conditions. The paper recommends repair methods and technologies, monitoring and conditions for further safe use. It also contains some results of tensions and deformations occurring in chambers under given load conditions.

Keywords:

closed fermentation chambers, biogas, heat loads, tension analysis, MES, CAD, CAE, Autodesk Inventor, Abaqus.