

dr hab. inż. Andrzej Seruga, prof. PK<sup>1\*)</sup>  
mgr inż. Marcin Midro<sup>1)</sup>  
mgr inż. Łukasz Ślaga<sup>1)</sup>

# Modernizacja wydzielonej komory fermentacyjnej po 15 latach eksploatacji

## *Modernization of separated digester chamber after 15 years of operation*

DOI: 10.15199/33.2015.09.31

(Studium przypadku)

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono analizę statyczno-wytrzymałościową kopuły zbiornika wydzielonej komory fermentacyjnej (WKF). Wyniki otrzymane z analizy wykazały niedobór nośności do 15% w przekrojach charakterystycznych kopuły i przekroczenie dopuszczalnej szerokości rys. Na istniejącej kopule zbiornika wykonano dodatkowy płaszcz żelbetowy. W podsumowaniu przeanalizowano wpływ zaproponowanego sposobu wzmocnienia na stan naprężeń w kopule podczas eksploatacji oraz w sytuacji awaryjnej pracy zbiornika (chwilowe przepełnienie).  
**Słowa kluczowe:** kopuła żelbetowa, stan naprężenia, wzmocnienie kopuły, zbiornik WKF.

**Abstract.** The paper presents static-strength analysis of digester chamber RC dome. The results of FEM numerical analysis indicated 15% deficiencies in the bearing capacity of the investigated cross-sections. Also calculated cracks' widths exceeded allowable values. Method of repairing and strengthening the dome by pouring additional RC dome's cover was proposed. In conclusion, the influence of the suggested method on the stress state in the dome (during operation and emergency situation – tank overflow) was analyzed.

**Keywords:** digestion chamber, dome strengthening, reinforced dome, stress state.

Zbiorniki żelbetowe to obiekty inżynierskie, w których przy doborze geometrii najistotniejsze jest spełnienie stanu granicznego użyteczności. Podstawowym kryterium podczas realizacji i eksploatacji zbiorników na ciecie jest zachowanie ich szczelności [1]. Na etapie projektowania należy przeanalizować możliwość wystąpienia zarysowania konstrukcji zbiornika podczas wznoszenia i eksploatacji, uwzględniając „próbę szczelności” oraz sytuacje awaryjne przy przepełnieniu zbiornika.

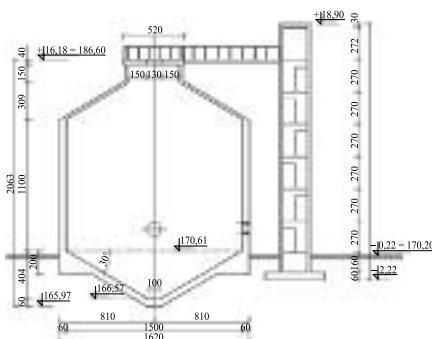
W artykule przedstawiono sposób przywrócenia przydatności do użytkowania zbiornika WKF po wyłączeniu z użytkowania w 2012 r. na skutek wielu przecieków w kopule stożkowej. Zaproponowane rozwiązanie obejmuje iniekcję rys na kopule zbiornika oraz wykonanie dodatkowego żelbetowego płaszcza.

### Opis konstrukcji

Zbiornik został zrealizowany w okresie wrzesień 1997 – maj 1999 r. Zbiornik WKF wykonany został w technologii tradycyjnej jako monolityczny, żelbetowy cylindryczny o wewnętrznym promieniu 7,5 m. Ściana zbiornika o stałej grubości 0,6 m została monolitycznie połączona z kopułą stożkową grubości 0,25 m o nachyleniu  $\alpha = 30^\circ$  (rysunek 1).

<sup>1)</sup> Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej

<sup>\*)</sup> Autor do korespondencji:  
e-mail: aseruga@pk.edu.pl



Rys. 1. Przekrój pionowy zbiornika WKF  
Fig. 1. Vertical cross-section of the tank

Zbiornik zaprojektowano oraz wykonano z betonu B30 (C25/30) o wodoszczelności W8 i mrozoodporności F150. Mieszanka betonowa została wykonana na łamanym kruszywie bazaltowym i cementem portlandzkim z dodatkami, odpowiadającym aktualnej klasie CEM II 32,5N. Ścianę zbiornika realizowano w 5 etapach betonowania, obwodowymi pasmami wysokości 2,0 m. Ostatni segment ściany o wysokości pasma 1,0 m betonowano wraz z analizowaną powłoką stożkową w okresie zimowym. Zbrojenie analizowanej kopuły zbiornika wykonano w dwóch warstwach z prętów żebrowanych A-III (34GS), z otuliną 40 mm, zbrojenie obwodowe z prętów  $\phi 10$  mm w rozstawie co 0,15 m, a zbrojenie promieniowe kopuły z prętów  $\phi 10$  mm w rozstawie 0,20 m w dolnej części kopuły, natomiast w miejscu maksymalnych naprężeń rozciągających co 0,13 m. Pręty

tworzą ostatecznie dwie siatki zbrojeniowe ułożone po wewnętrznej i zewnętrznej stronie kopuły. Dotychczasowe ocieplenie kopuły stanowiła warstwa styropianu grubości 0,05 m. Powierzchnię kopuły wykończono wyprawą cementową, na której ułożono gonty dachowe na lepiku.

Od momentu oddania do użytkowania, zbiornik przez przeszło 11 lat stanowił najważniejszy element inwestycji. Powódź w maju 2010 r. spowodowała długotrwały przestój obiektu, doprowadzając do sedimentacji osadu i zatkania rurociągów komory. Po dokonaniu niezbędnych robót remontowych i napełnieniu zbiornika pojawiły się wycieki z pęknięć i rys w dolnej części kopuły.

### Wyniki badań

W celu określenia przyczyn stanu awaryjnego oraz opracowania metody przywrócenia obiektu do użytkowania przeprowadzono badania doświadczalne. Zakres prac obejmował: inwentaryzację zarysowania; badania nieniszczące betonu; weryfikację lokalizacji zbrojenia kopuły oraz pobranie materiału do analizy chemicznej. Na podstawie pobranego materiału określono w laboratorium alkaliczność betonu (pH) i zawartość jonów chlorkowych. Morfologię i szerokość rys na górnej powierzchni kopuły zbiornika przedstawiono na rysunku 2. Oględziny obiektu ujawniły występowanie dwóch głównych rys obwodowych, pierwszej w miejscu połą-



— szerokość rysy  $w > 2$  mm  
 — szerokość rysy  $1 \text{ mm} < w < 2$  mm  
 — szerokość rysy  $0,2 \text{ mm} < w < 1$  mm

**Rys. 2. Zarysowanie kopuły zbiornika**  
 Fig. 2. Cracking of the tank dome

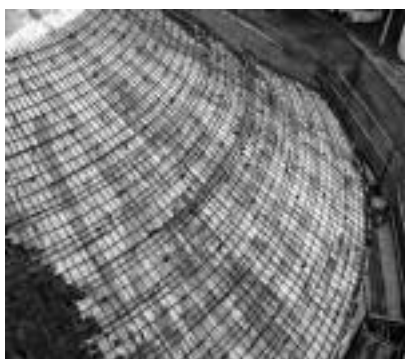
czenia ściany z kopułą, a drugiej w odległości ok. 2,40 m od zewnętrznej krawędzi ściany. Szerokość pierwszej rysy obwodowej wynosiła 0,3 – 0,6 mm, a drugiej średnio 1,6 mm, jednak lokalnie szerokość rys wynosiła 2,5 mm. Ponadto zinventaryzowano w kopule 40 rys promienistych szerokości 0,2 – 1,1 mm. Na podstawie badań nieniszczących betonu określono wytrzymałość betonu kopuły na ściskanie. Średnia jej wartość wynosiła 31,98 MPa, przy odchyleniu standardowym  $s = 3,56$  MPa. Z pomiarów dokonanych za pomocą femetru wynika, że zastosowano zbrojenie  $\phi 10$  mm, a jego rozstaw pokrywa się z założeniami projektu. Grubość otuliny jest zróżnicowana i wynosi  $51 \div 77$  mm. Beton poddano analizie chemicznej zgodnie z [2, 3]. Jej wyniki wykazały zbliżoną wartość pH pobranych próbek, która wynosiła  $11,30 \div 12,00$ . Otrzymana wartość odczynu wodnego w każdym przypadku była wyższa od minimalnej ( $\text{pH} = 10,80$ ), zapewniającej właściwości ochronne stali zbrojeniowej [4]. Ponadto wykonano kompleksową analizę statyczną kopuły zbiornika WKF w programie numerycznym. W ramach analizy zestawiono wszystkie istotne oddziaływania na zbiornik w okresie eksploatacji (zbiornik ocieplony, nieocieplony), biorąc pod uwagę również możliwość chwilowego przepełnienia (sytuacja awaryjna). Analiza numeryczna ściany i kopuły zbiornika wykazała możliwość wystąpienia naprężeń rozciągających przekraczających średnią wytrzymałość betonu na rozciąganie osiowe ( $f_{cm} = 2,6$  MPa dla C25/30). Maksymalne naprężenia rozciągające na kierunku południowym o wartości  $\sigma = 3,10$  MPa występują w odległości ok. 2,4 m od zewnętrznej krawędzi ściany

i powodują powstanie rys obwodowych na górnej powierzchni kopuły. W kierunku równoleżnikowym naprężenia rozciągające na zewnętrznej powierzchni o wartości  $\sigma = 3,01$  MPa powodują miejscowe zarysowanie konstrukcji na kierunku południowym.

### Sposób naprawy kopuły

W wyniku przeprowadzonych obliczeń statycznych i badań oraz analiz studialnych [5, 6] zaproponowano wykonanie dodatkowego, żelbetowego płaszcza na istniejącej kopule. Program naprawy obejmował:

- zainiektowanie głównej rysy obwodowej i rys promienistych, o szerokości powyżej 0,1 mm, kompozycjami żywicy epoksydowych z regulowanym czasem wiązania do 10 min (połączenie siłowe);
- po wypełnieniu rys i oczyszczeniu powierzchni kopuły, wykonanie warstwy szczerwnej umożliwiającej lepsze zespolenie nowego betonu kopuły z istniejącym;
- osadzenie na kleju epoksydowym prętów zbrojeniowych średnicy  $\phi 10$  mm, w celu stabilizacji i zespolenia zbrojenia z istniejącą powłoką oraz wykonanie siatki zbrojeniowej (fotografia) ułożonej w środkowej płaszczyźnie warstwy betonu;
- betonowanie zewnętrznego płaszcza żelbetowego kopuły grubości min. 100 mm z betonu C30/37 o wodoszczelności W10, mrozoodporności F150 i konsystencji K2, na kruszywie bazaltowym;
- przeprowadzenie wstępnej próby szczelności zbiornika;
- wykonanie, po okresie pielęgnacji i dojrzewania betonu (min. 28 dni), warstwy termoizolacji grubości 0,10 m z wełny mineralnej ułożonej na kleju oraz pokrycia wierzchniego (z gontu bitumicznego).



Fot. M. Midro

**Naprawa kopuły zbiornika WKF**  
 Reconstruction of the chamber dome

### Wnioski

W wyniku przeprowadzonych badań doświadczalnych i analiz numerycznych sformułowano następujące wnioski:

■ powierzchnia zbrojenia kopuły przed naprawą nie spełniała aktualnych normowych warunków minimalnego zbrojenia w konstrukcjach żelbetowych, które powinny być wodoszczelne. Po usunięciu istniejącej izolacji termicznej (styropian grubości 50 mm) uwidoczniły się ślady świadczące o próbie wypełnienia zaczynem cementowym rys powstałych w okresie dojrzewania betonu (fotografia);

■ druga, główna rysa obwodowa powstała w pierwszym roku eksploatacji, w okresie zimowym, kiedy wystąpiły maksymalne naprężenia od oddziaływania termicznego (maksymalna amplituda temperatury). Rysa powstała w przekroju najbardziej wyężonym (zgodność z wynikami analizy MES);

■ w trakcie eksploatacji powstałe rysy samouszczelniły się osadem i przestały częściowo przepuszczać medium;

■ podczas powodzi w 2010 r. odnotowano przekroczenie projektowanego poziomu wypełnienia komory. W wyniku problemów z drożnością rur odpływowych nastąpiło przeciążenie kopuły (sytuacja awaryjna), a na poziomie maksymalnych naprężeń południowych (2,4 m od krawędzi ściany) zwiększyła się szerokość drugiej rysy obwodowej;

■ zwiększenie rzeczywistej zewnętrznej grubości betonowej otuliny zbrojenia kopuły, w stosunku do projektowanej, przyczyniło się do powstania rys we wczesnym okresie dojrzewania betonu;

■ naprężenia rozciągające w betonie kopuły przed naprawą osiągały poziom wytrzymałości betonu na rozciąganie osiowe, a zatem sposób naprawy z zastosowaniem dodatkowego żelbetowego płaszcza był najtańszą metodą przywrócenia zdolności eksploatacyjnej zbiornika. Zainiektowanie istniejących rys nie byłoby rozwiązaniem wystarczającym.

### Literatura

- [1] PN-EN 1992-3, Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 3: Silosy i zbiorniki na ciecz, listopad 2008.
- [2] PN-EN 206-1, Beton – Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- [3] Czamecki L., Emmons P. H.: Naprawa i ochrona konstrukcji betonowych, Polski Cement, Kraków 2002.
- [4] Wieczorek G., Korozja zbrojenia inicjowana przez chlorki lub karbonatyzację otuliny, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 2002.
- [5] Drobiec Ł., Jasiński R., Piekarczyk A.: Diagnostyka konstrukcji żelbetowych. Metodologia, badania polowe, badania laboratoryjne betonu i stali, tom 1, PWN, Warszawa 2010.
- [6] Seruga A., Seruga T., Midro M., Modernizacja Wydzielonych Komór Fermentacyjnych po czterdziestu pięciu latach eksploatacji, Czasopismo Techniczne, seria: Budownictwo, 2-B/2011, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2011.

Przyjęto do druku: 02.08.2015 r.