

**XXIV**XXIV Konferencja Naukowo-Techniczna  
Szczecin-Międzyzdroje, 26-29 maja 2009**awarie budowlane**

Prof. dr hab. inż. BOHDAN HNIDEC  
Prof. dr hab. inż. WIKTOR KWASZA  
St. nauk. pracownik LUBOW SALICZUK  
Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Lwowska

## **ANALIZA PRZYCZYŃ STANU AWARYJNEGO I ZNISZCZENIA ŻELBETOWEGO ZBIORNIKA WIEŻOWEGO**

### **ANALYSIS OF REASONS OF THE EMERGENCY STATE AND DESTRUCTION OF REINFORCED-CONCRETE WATER-TOWER**

**Streszczenie** Podano wyniki analizy wystąpienia stanu awaryjnego oraz przyczyn zniszczenia zbiornika wieżowego.

**Abstract** The analysis of reach of the emergency state and reason of destruction of water-tower is presented.

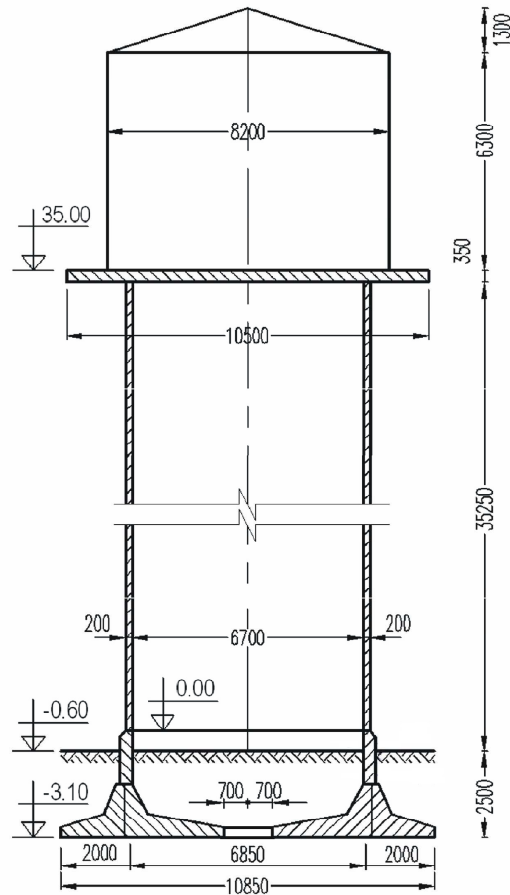
### **Wstęp**

Żelbetowe zbiorniki wieżowe należą do jednej z odmian cienkościennych konstrukcji przestrzennych, które z reguły, wykonuje się w monolitycznym żelbecie. Przy ich budowie stawia się odrębne, podwyższone wymagania dotyczące technologii wykonawstwa prac i zabezpieczenia przewidywanych projektem warunków eksploatacji. Niedotrzymanie tych wymagań może spowodować zawalenie się budowli. Przykład takiego zawalenia budowli zaprezentowano poniżej jako wynik wykonanej techniczno-budowlanej ekspertyzy z ustaleniem przyczyn zniszczenia żelbetowego zbiornika wieżowego, zbudowanego na terenie kopalni górnico-chemicznego kombinatu produkcji siarki. Celem pracy była analiza okoliczności powstania awaryjnego stanu i ustalenia przyczyn zniszczenia zbiornika wieżowego.

### **1. Konstrukcja zbiornika wieżowego, budowa i warunki eksploatacji**

Zbiornik wieżowy o wysokości 35 m (rys. 1) ma cylindryczny, monolityczny szyb żelbetowy o zewnętrznej średnicy 7,1 m ze stałą po wysokości szybu grubością ściany 20cm. Projektowa klasa betonu B15 (marka 200). Szyb zbrojony jest podwójną siatką z prętów o średnicy 10 mm o oczkach 200×200 mm.

Szyb wieży posadowiony jest na okrągłej płycie żelbetowej założonej 2,5 m poniżej powierzchni terenu. W poziomie posadowienia zalega grunt gliniasty ze wskaźnikiem konsystencji od miękkoplastycznego do twardego  $0 \leq I_L \leq 1,0$  przy współczynniku porowatości  $e = 0,7$ , z umownym oporem obliczeniowym  $R_0 = 0,18 \dots 0,2$  MPa.



Rys. Ogólny wygląd wieży (przekrój)

W górnej części na poziomie 35,00 m szyb wieży kończy się nośną okrągłą płytą żelbetową o średnicy 10,5 m, na której zainstalowano cylindryczny metalowy zbiornik z płaskim dnem o objętości 300 m<sup>3</sup>.

Szyb wieży był betonowany sekcjami w deskowaniu przestawnym w okresie od października do grudnia przy dodatnich temperaturach, które wahały się w granicach 3...8°C. Mieszanka betonowa pochodziła ze scentralizowanego węzła i na podstawie badań wytrzymałościowych na kostkach sześciennych odpowiadała wymaganiom projektu. Faktyczna wytrzymałość betonu według wyników trzech badań dla każdej sekcji o wieku 8...28 dni wahała się w granicach 18,1...22,5MPa. Według danych dokumentacji wykonawczej zewnętrzna i wewnętrzna powierzchnia szybu były dokładnie zacierane zaprawą cementową, a przerwy robocze na styku sekcji nie miały napływów i małżowin. Jakość wykonania prac była zadowalająca. Geodezyjnie potwierdzona była również pionowość szybu wieży zbiornika.

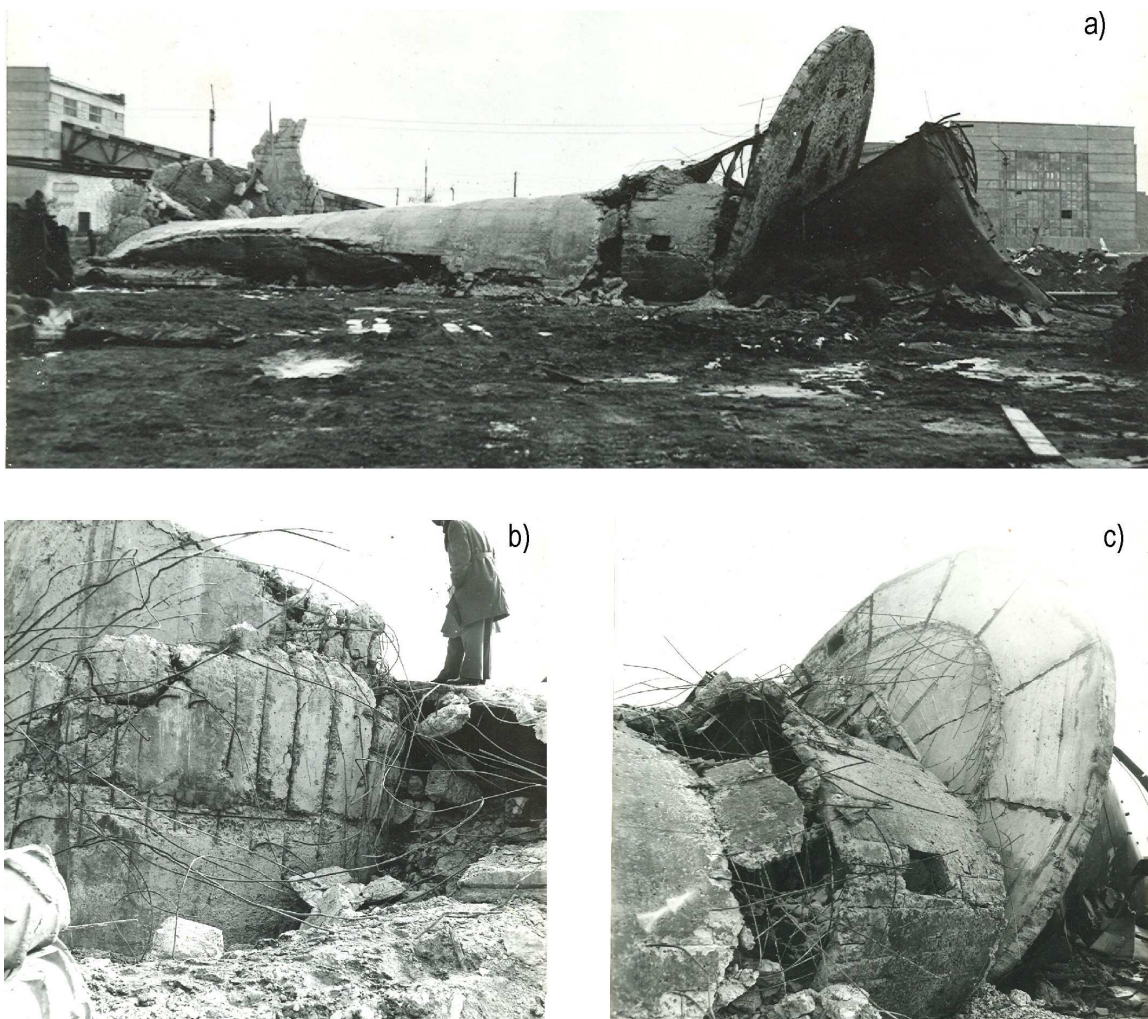
W systemie sieci wodociągowej kopalni zbiornik wieżowy był eksploatowany przy pełnym projektowym obciążeniu przez okres dłuższy niż dziewięć lat, a po tym czasie był wyeliminowany z systemu wodociągu kopalni i aż do zniszczenia nie był eksploatowany.

Czynnikiem komplikującym eksploatację wieży przez cały okres jej istnienia było – w stosunku do podstawowych obciążeń pionowych i poziomych wiatrem – oddziaływanie dynamicznych obciążeń od przemysłowych eksplozji w kopalni. Według zaprezentowanych dokumentalnych świadectw w kopalni przeprowadzało się blisko 150 eksplozji na rok przy przeciętnej wielkości ładunku masowej eksplozji 8...10 t i interwale spowolnienia 25 m/sek. Masa ładunku materiału eksplodującego na jeden stopień spowolnienia wynosiła do 2,0 t.

Odległość od miejsca eksplozji do wieży zbiornika określona z planu wydobywania ze złoża z oznaczeniem miejsc przeprowadzenia eksplozji w okresie zawalenia wieży wynosiła 1670 m.

## 2. Charakter i warunki zniszczenia zbiornika wieżowego

Zawalenie się wieży zbiornika nastąpiło rano przed początkiem dniówki (przy nieobecności pracujących) błyskawicznie. Przypuszczalnie zniszczenie szybu rozpoczęło się na wysokości 1,2...1,8 m od powierzchni terenu (czyli orientacyjnie w granicach drugiej sekcji betonowania – od poziomu 1,2 do poziomu 1,8 m). Osobliwością zniszczenia jest runięcie wieży «na bok» czyli przewrócenie się szybu (rys. 2a). Wskutek uderzenia przy spadaniu szyp wieży «roztrzaskał» się. Odłamki betonu były przeważnie dużych rozmiarów. Małe odłamki były tylko w dolnej części, gdzie odbyło się początkowe złamanie szybu i w górnej części, gdzie najbardziej zaznaczyły się konsekwencje uderzenia o ziemię skupionej masy górnej płyty (rys. 2 b, c.).



Rys. 2. Ogólny wygląd zniszczenia wieży upadku

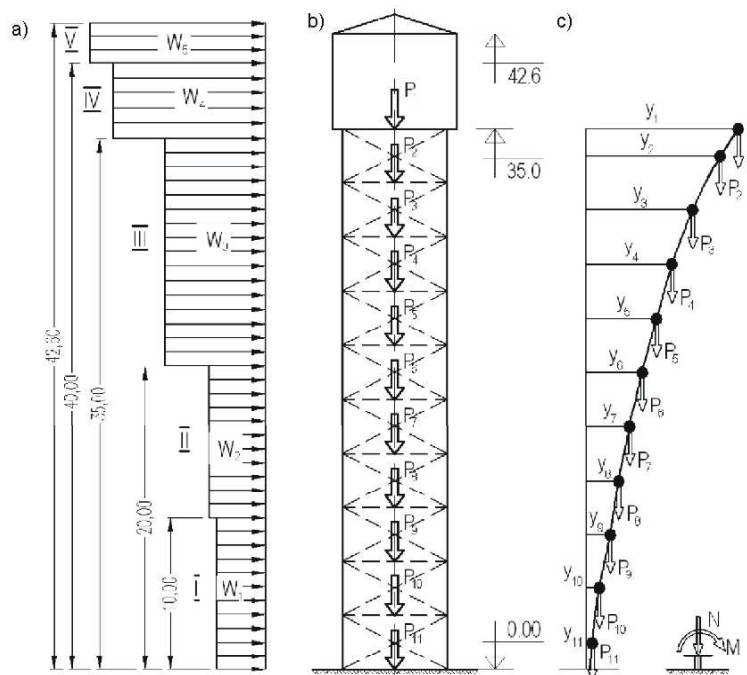
Wyszarpiny zbrojenia obserwowano tylko w dolnych i górnych częściach szybu i towarzyszyła mu destrukcja warstwy ochronnej. Charakter zniszczenia w dolnej części szybu można odnieść do zniszczenia od łącznego oddziaływania zginania i skręcania. O obecności skręcania się szybu świadczą pochyłe zarysowania w jego dolnej części. Zniszczenie szybu w górnej części i rozdrobnienie betonu nastąpiło wskutek wstrząsu od uderzenia górnej płyty o ziemię.

W momencie zniszczenia szyb wieży był obciążony tylko ciężarem własnym elementów wieży i zbiornika. Tymczasowe obciążenie (woda w zbiorniku i korzystne obciążenie na górnej płycie) były nieobecne. Temperatura powietrza wynosiła  $-1,0^{\circ}\text{C}$ , a szybkość wiatru – 1 m/sek., w porywach do 5 m/sek. W momencie zniszczenia eksplozyjne czynności w kopalni nie odbywały się.

### 3. Wyniki kontrolnych obliczeń i przyczyny zniszczenia zbiornika wieżowego

Przeprowadzone obliczenia kontrolne miały na celu sprawdzenie, czy możliwe jest zniszczenie wieży w dolnej części przez niedostateczną wytrzymałość betonu (obliczenie na łączne działanie pionowych i poziomych obciążeń wiatrowych), czy też wskutek działania dodatkowych wielokrotnych impulsowych obciążeń od przemysłowych eksplozji w kopalni i działanie eksplozywnej powietrznej fali.

Obliczenia na pionowe i poziome obciążenia wiatrowe (rys. 3) były wykonane w dwóch wariantach: przy założeniu, że wytrzymałość betonu odpowiada projektowej, a na wieżę działają maksymalne obciążenia obliczeniowe, i przy założeniu, że jest ona o 50% mniejsza od projektowej, a na wieżę działają realne w momencie zniszczenia obciążenia: ciężar własny konstrukcji, ciężar zbiornika bez wody, obciążenie wiatrem, które odpowiada szybkości wiatru 1 m/s, (w porywach do 5 m/s). Obliczenia według pierwszego wariantu wykazały, że nośność szybu wieży jest zapewniona, czyli potwierdziły prawidłowość powziętych rozwiązań projektowych. Obliczenia według drugiego wariantu również potwierdziły dostateczną nośność szybu, mimo zaniżenia wytrzymałości betonu na 50%. Stąd wyeliminowano przypuszczenie o możliwości zniszczenia szybu od niedostatecznej wytrzymałości betonu.



Rys. 3. Schematy obliczeniowych obciążeń szybu wieży: a – wykres obciążenia wiatrem; b – pionowe obciążenia; c – oś zginania szybu, razem z pionowym obciążeniem.

Ten wynik potwierdza się również charakterem zniszczenia i położenia zawalonego szybu, które świadczy, że zniszczenie nastąpiło nie od ściskania, jak to miaoby miejsce przy niedostatecznej wytrzymałości betonu, a od zginania. Charakterystyczne zniszczenie od ściskania przy niskiej wytrzymałości betonu to niemal pionowe osiadanie górnej części wieży z rozdro-

bnieniem betonu dolnej części po konturze całego szybu, taki wypadek zniszczenia jest opisany w [1]. W danym wypadku nastąpiło miejscowe złamanie odcinka szybu, po czym wieża pochyliła się, a potem upadła «na bok» ze zginaniem i jednoczesnym przewróceniem szybu i jego zniszczeniem od uderzenia o ziemię.

Wyniki badań wpływu sejsmicznego efektu od przemysłowych eksplozji na stan budowli kopalni, wykonanych przez naukowo-badawczy instytut (NBI) geofizyki AN Ukrainy, wykazały, że najbardziej niebezpiecznym oddziaływaniem na budowle przy masowych eksplozjach jest uderzeniowa powietrzna fala, od której obciążenia podczas oddzielnych eksplozji przewyższają dopuszczalne dla rozlokowanych na terenie kopalni budynków i budowli. To orzeczenie potwierdzają wyniki oględzin stanu konstrukcji budowli, wysokości do 15,0 m, rozlokowanych opodal zburzonej wieży (budynku administracyjnego kopalni, szkieletowo-płytowego budynku pracowni napraw samochodów i in.). W konstrukcjach nośnych tych budynków (stropach, płytach ściennych, schodach i in.) uwidocznione są zarysowania o charakterze, których przyczyna powstania nie ulega wątpliwości. To wynik okresowo powtarzanych w ciągu długotrwałego czasu dynamicznych działań od eksplozji w kopalni. Trzeba również zaznaczyć, że NBI geofizyki zalecał w celu zmniejszenia działania powietrznej fali na budowle ograniczyć ciężar ładunków jednego stopnia do 1,2...1,4 t i zwiększyć interwał krótkospowolnionego eksplodowania do 35 m/s, nie zmniejszając ogólnej mocy eksplozji. Te zalecenia, do czasu zniszczenia wieży, nie były wykonane.

Należy uważać, że dla rozlokowanego obok ze zbadanymi budowlami zbiornika wieżowego o większej wysokości i znacznie mniejszych rozmiarach w planie, powietrzna fala uderzeniowa będzie jeszcze bardziej niebezpiecznym czynnikiem, który stwarza obciążenia, większe od krytycznych. Toteż wykonano kontrolne obliczenia nośności szybu wieży również na działanie powietrznej fali uderzeniowej.

Ponieważ działanie fali uderzeniowej w okresie istnienia wieży powtarzało się wielokrotnie, można uważać, że beton szybu pracował w warunkach obciążeń wielokrotnie zmiennych (na zmęczenie), przy znakozmiennym cyklu naprężeń. Toteż nośność pracującego w takich warunkach szybu należy oceniać nie według wytrzymałości statycznej, a według wytrzymałości zmęczeniowej betonu.

Na podstawie wyników obliczeń ustalono co następuje:

1. Częstotliwość drgań własnych wieży z niewypełnionym wodą zbiornikiem  $\omega = 9,97 \text{ sek}^{-1}$  niemal zbiega się z częstotliwością drgań wymuszonych przez eksplozję,  $\omega_1 = 10,47 \text{ sek}^{-1}$ . Zatem, przy pobudzaniu drgań wieży przez eksplozje ma miejsce zjawisko, bliskie rezonansu, gdy siły bezwładności mogą wzrastać wielokrotnie.
2. Przy wypełnieniu zbiornika wodą różnica między częstotliwością drgań własnych  $\omega = 6,02 \text{ sek}^{-1}$  i wymuszonych, pobudzonych eksplozjami  $\omega_1 = 10,47 \text{ ek}^{-1}$ , staje znacznie większa, co prowadzi do zmniejszenia sił bezwładności i polepsza warunki pracy szybu wieży.
3. Z przedstawionej analizy częstotliwości drgań widać, że najbardziej niekorzystnym stanem wieży z punktu widzenia jej odporności na działanie powietrznej fali uderzeniowej jest stan przy zbiorniku niewypełnionym wodą. Otóż zaprzestanie eksploatacji wieży (nieobecność wody w zbiorniku) znacznie pogorszyło jej odporność na eksplozje i praktycznie doprowadziło do powstania zjawisk rezonansowych.
4. Wskutek wzbudzonych eksplozjami drgań w betonie dolnej krawędzi szybu wieży powstawały znakozmienne naprężenia: maksymalne na ściskanie 3,42 MPa; minimalne na rozciąganie -1,006 MPa, co stwarzało asymetryczny cykl naprężeń ze współczynnikiem asymetrii  $\rho = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} = -0,29$ , przy którym granica wytrzymałości zmęczeniowej betonu znacznie maleje.

Ponieważ w normach projektowania dla ujemnych wartości  $\rho$  współczynnik warunków pracy betonu na zmęczenie nie jest przedstawiany, w przeprowadzonych obliczeniach obliczono go według znanego kryterium Gudmana-Johnsona, i stanowił:

$$\gamma_{b1} = \frac{0,5}{1 - 0,5\rho} = \frac{0,5}{1 - 0,5(-0,29)} = 0,44 \quad (1)$$

Zatem z uwzględnieniem innych normowanych współczynników warunków pracy granica wytrzymałości zmęczeniowej betonu klasy B 15 (M200) na ściskanie przy  $\rho = -0,29$  wynosi  $R_{by} = 2,36$  MPa, co jest wartością mniejszą od faktycznych maksymalnych naprężeń w betonie 3,42 MPa. Wynika stąd, że przy masowych przemysłowych eksplozjach wytrzymałość betonu szybu wieży była za mała i stało się możliwym jego zniszczenie przy niesprzyjającym zbiegu różnych przypadkowych czynników.

#### 4. Analiza dynamiki zawalenia się wieży

Z uwzględnieniem przedstawionej powyżej analizy charakteru zniszczenia i wyników kontrolnych obliczeń proces zawalenia się wieży może być zaprezentowany następująco.

Wskutek dynamicznych wpływów od systematycznych przemysłowych eksplozji została osiągnięta granica wytrzymałości zmęczeniowej betonu na oddzielnych (możliwie osłabionych) odcinkach dolnej części szybu wieży. Poza tym, wskutek drgań i naruszenia struktury betonu na tej samej części szybu doszło do częściowej utraty przyczepności zbrojenia z betonem.

Z kolei te zjawiska doprowadziły do tego, że w wyniku nawet nieznacznego wiatrowego obciążenia mogło dojść do miejscowego złamania odcinka powłoki w dolnej części szybu wieży, po czym nastąpiło jej nachylenie, któremu towarzyszyło mimośrodowe obciążenie ciężarem własnym konstrukcji wieży i zginanie szybu, co z kolei doprowadziło do dalszego zwiększenia mimośrodków działania pionowych sił.

W dalszym etapie proces zwiększenia mimośrodków i odchylenia od pionu wierzchu wieży skończył się pełnym zniszczeniem dolnego odcinka szybu i jego obrotem. Wskutek uderzenia o ziemię szymb rozpadł się na duże ułamki.

#### Wnioski

1. Zniszczenie wieży nie mogło nastąpić od kombinacji maksymalnych pionowych i poziomych obciążeń przy projektowych charakterystykach nośności betonu i zbrojenia.
2. Najbardziej prawdopodobną przyczyną zniszczenia żelbetowego szybu wieży jest systematyczne działanie przemysłowych eksplozji w kopalni kombinatu górnictwo-chemicznego i spowodowane nimi wielokrotne drgania szybu wieży przy znakozmiennych naprężeniach w betonie.
3. Zaprzestanie eksploatacji wieży i zmniejszenia skupionej masy w górnej jej części przez nieobecność wody w zbiorniku pogorszyło odporność dolnej części szybu na dynamiczne wpływy od masowych, systematycznych eksplozji przemysłowych i doprowadziło do zmniejszenia wytrzymałości zmęczeniowej betonu na ściskanie.

#### Literatura

1. Шкинев А.Н. Аварии на строительных объектах, их причины и способы предупреждения и ликвидации. // -М.: Госстройиздат, 1962., 219 с.