

Paweł Krzyworączka, Jerzy Milka***

TECHNOLOGIA BEZPIECZNEGO POWALANIA ŻELBETOWYCH HIPERBOLOIDALNYCH CHŁODNI KOMINOWYCH

1. Wprowadzenie

Na terenie elektrowni „Łagisza” w Będzinie wybudowano w latach 1962–1975 sześć hiperboloidalnych chłodni o wysokości $H = 105$ m. Jedną z tych chłodni (nr 6) przeznaczono do likwidacji [10].

Zgodnie z zasadami projektowania tego typu obiektów chłodnia otrzymała kształt hiperboloidy obrotowej, co umożliwiło zastosowanie teorii błonowej pracy statycznej konstrukcji [9]. Oznacza to, że siły wewnętrzne i naprężenia w powłoce, zarówno od ciężaru własnego, jak i od działania wiatru, występują jako południkowe i równoleżnikowe w płaszczyźnie tworzącej powłoki. Nie występują tu momenty zginające (z wyjątkiem górnego i dolnego obszaru brzegowego) oraz momenty od różnicy temperatur między zewnętrzną i wewnętrzną jej powierzchnią. Dzięki temu płaszcz chłodni jest bardzo cienką, w stosunku do rozmiarów budowli, strukturą i zachowuje stateczność dzięki ciągłości konstrukcji i idealnemu dotrzymaniu założonego kształtu. Obrazowo rzecz ujmując, proporcje grubości płaszcza do średnicy chłodni są mniej korzystne niż proporcje grubości ścianki jajka do jego średnicy. Dodatkowym wzmocnieniem jest górny pierścień o szerokości 94 cm, który stanowi jednocześnie podest remontowy. Taka budowa powoduje, iż obiekt posiada stosunkowo niewielką masę przy dużej kubaturze.

Na podstawie wielu prac naukowo-badawczych i badań modelowych potwierdzono [9], że hiperboloidalny płaszcz chłodni zachowuje stateczność i odporność na siły od ciężaru własnego i dynamicznego działania wiatru, jeżeli stanowi geometryczną i konstrukcyjną całość. Znaczne ubytki bądź degradacja materiału płaszcza spowodować mogą jego lawinowo narastające zawalenie się. Równocześnie duża powierzchnia boczna obiektu powoduje, iż jest on bardzo wrażliwy na siły boczne (parcie wiatru). Znane są przypadki samoczynnego zawalenia się chłodni kominowych na skutek wiatru, korozji lub nawet różnic w czasie wylewania betonu [10]. Każdy dowolnie wybrany element płaszcza poddany jest w czasie eks-

* Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

** Przedsiębiorstwo „Grań” Spółka z o.o., Olkusz

ploatacji obiektu siłom wewnętrznym daleko odbiegającym od wielkości dopuszczalnych w materiale żelbetowym, w stanie dwuosiowego naprężenia.

Również odporność dwukrzyżowniczej konstrukcji na utratę stateczności jest wysoka. Współczynnik bezpieczeństwa, rozumiany jako stosunek naprężeń niszczących do rzeczywiście występujących, wynosi 5 do 15, w zależności od miejsca w konstrukcji. Współczynniki bezpieczeństwa maleją gwałtownie pod wpływem obciążeń narastających w wyniku uszkodzenia, usunięcia lub degradacji fragmentu konstrukcji.

Może to być wykorzystane przy planowaniu robót rozbiórkowych [5]. Decydującym obciążeniem dla konstrukcji jest jej ciężar własny. Średnio 1 m² płaszcza ma masę około 400 kg. Płat płaszcza o powierzchni 100 m² posiada masę 40 ton [10]. Masy te powodują powstawanie znacznych sił, które w przypadku ich uwolnienia spowodują lawinowe zniszczenie konstrukcji.

Płaszcz chłodni wspierał się na układzie słupów skośnych o przekroju kołowym i średnicy 40 cm. Konstrukcja betonowa płaszcza zaprojektowana była z betonu R_w 200, co odpowiada B-18, jednak w rzeczywistości wytrzymałość tę oceniono jako wyższą o 20 do 50%. Całkowita powierzchnia płaszcza wynosiła około 12 000 m², a ciężar całkowity chłodni sięgał około 4000 ton. Na przełomie lat 80. i 90. płaszcz chłodni został wzmocniony i zabezpieczony za pomocą betonu torkretowego o grubości 3 do 5 cm, zbrojonego siatką z prętów Ø 10 mm i oczkach 20/20 cm. To wzmocnienie dodatkowo zwiększyło ciężar konstrukcji o około 800 ton [10].

Obiekt ten z powodu modernizacji elektrowni przeznaczony został do wyburzenia. W jego miejsce zostanie wybudowana nowoczesna chłodnia.

Po przeprowadzeniu analiz wykonanych dotychczas wyburzeń tego typu obiektów oraz stanów awaryjnych, jakie były powodem samozawalenia się chłodni kominowych (np. w elektrowni „Turów” w 1986 roku), celowe wydaje się nadanie konstrukcji w czasie wyburzania takiego stanu nierównowagi, aby siły grawitacyjne od ciężaru własnego spowodowały jej zniszczenie. Stan taki można osiągnąć w zasadzie jedynie przy wykorzystaniu metody strzałowej. Mechaniczne wyburzenie chłodni kominowej jest możliwe, aczkolwiek byłoby bardzo kosztowne i bardziej niebezpieczne. O wiele tańsza, bezpieczniejsza i szybsza w realizacji jest metoda strzałowa.

2. Analiza zagrożeń

Podczas obalania chłodni metodą minerską (z użyciem MW) należało liczyć się z występowaniem kilku rodzajów zagrożeń dla otoczenia [2, 4, 6, 8], tj. z rozrzutem odłamków, drganiami wywołanymi detonacją MW i upadkiem obiektu [7] oraz powietrzną falą uderzeniową (PFU). Najgroźniejsza okazała się PFU, ze względu na specyfikę technologii wyburzania tego obiektu. Dodatkowym zagrożeniem podczas powalania chłodni była możliwość jej upadku w niepożądanym kierunku oraz ewentualne cofanie się chłodni w czasie padania. W odległości 2÷3 m od chłodni znajdowała się stalowa estakada z zasilaniem zakładu (rys. 1), dlatego konieczne było zastosowanie technologii wyburzania zapobiegającej cofaniu się obiektu.



Rys. 1. Wyburzana chłodnia (po prawej) i chroniona estakada (po lewej)

Rozrzut odłamków ze słupków podporowych eliminowano stosując przykrycia miejsc założenia ładunków. Otwory strzałowe w płaszczu chłodni — ze względu na ich liczbę oraz położenie, kilkanaście metrów nad powierzchnią terenu — zostały zabezpieczone jedynie bardzo starannie wykonaną przybitką.

Obliczono prognozowaną prędkość drgań na obiekcie chronionym (sąsiednia chłodnia) na poziomie 2,7 mm/s, przyjmując ładunek na serię milisekundową 274 kg i średnią odległość detonowanych ładunków MW od obiektu chronionego 97 m.

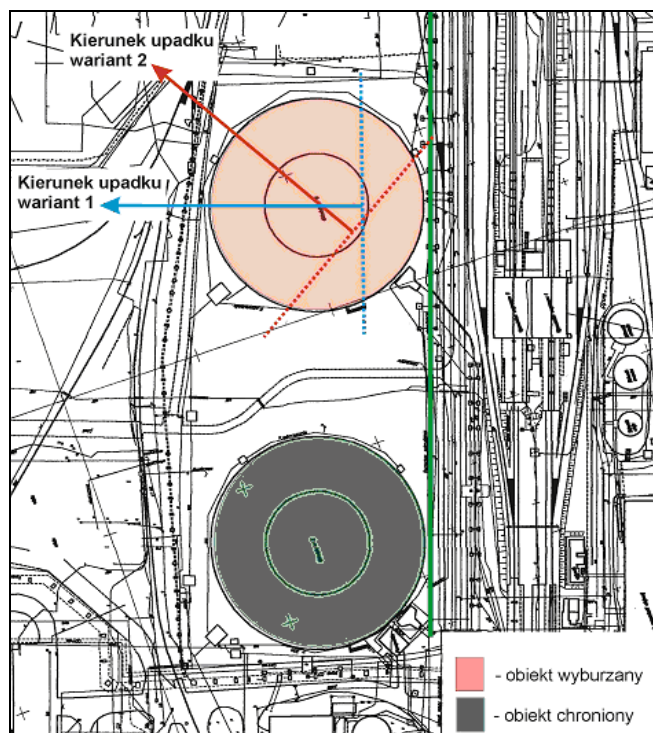
Zakładając prędkość drgań na poziomie 10 mm/s, jako próg bezpieczeństwa dla obiektu chronionego wyznaczono strefę zagrożenia drganiami wywołanymi detonacją MW na poziomie 47 m [10], tak więc detonacja MW nie zagrażała sąsiedniej chłodni.

Wielkość powietrznej fali uderzeniowej jest funkcją ilości MW odpalanego w jednej serii oraz odległości miejsca strzelania od obiektu chronionego [1, 2]. Początkowo zamierzano ładunki MW w płaszczu chłodni inicjować lontem detonującym. Przeprowadzono obliczenia prognostyczne PFU w dwóch wariantach: dla powalania chłodni w kierunku prostopadłym do chronionej estakady oraz dla powalania obiektu pod kątem 45° do chronionej konstrukcji stalowej (rys. 2).

W pierwszym wariantcie, dla detonacji 34 kg MW (ponieważ tylko połowa detonowanych ładunków „widzi” obiekt chroniony, którym jest druga chłodnia) i średniej odległości od obiektu chronionego 110 m, prognozowana wartość ciśnienia PFU wyniosła 1150 Pa. Powierzchnia boczna chronionej chłodni wynosi około 5340 m². Przy takim ciśnieniu na chłodnię działałaby siła rzędu 6,1 MN. Taka wartość powietrznej fali uderzeniowej mogłaby uszkodzić obiekt chroniony, a nawet doprowadzić do jego zawalenia.

W wariantcie drugim założono, iż chłodnia jest obalana w kierunku ukośnym w stosunku do chronionej estakady (rys. 2). Taki manewr pozwolił ukierunkować falę uderzeniową do środka wyburzanej chłodni. Dla detonacji 67,87 kg MW i średniej odległości od obiektu chronionego 110 m wartość ciśnienia PFU wyniosłaby 2714 Pa, jednak w tym wariantcie fala

uderzeniowa odbije się od płaszcza wewnątrz wyburzanej chłodni. Nastąpi gwałtowny wzrost naprężeń na obwodzie tej chłodni, ale czas działania sił spowodowanych PFU będzie na tyle krótki, że nie powinien uszkodzić tylnej ścianki likwidowanej chłodni — w stopniu grożącym niekontrolowanym załamaniem i upadkiem w niewłaściwą stronę.



Rys. 2. Szkic sytuacji terenowej — likwidowana chłodnia i obiekty chronione

Po przeanalizowaniu zagrożenia PFU stwierdzono, że należy wyeliminować odpalenie lontem. Przy liczbie 3600 ładunków niemożliwe było również odpalenie elektryczne. W związku z tym przyjęto wariant odpalania ładunków systemem mieszanym: elektryczno-nieelektrycznym. Przy tym rozwiązaniu mamy do czynienia z ładunkami odpalanymi tylko wewnątrz otworów strzałowych. Dla jednego opóźnienia czasowego zostaje odpalone 6,25 kg dynamitu. Dla otworów skrajnych (rys. 2) zaistnieją następujące warunki propagacji zagrożeń:

- wielkość ładunku przypadającego na jedno opóźnienie: 6,25 kg,
- odległość miejsca strzelania od najbliższej powierzchni chronionej: 50 m,
- długość przybitki: 12 cm,
- wielkość zabioru: 15 cm.

Dla tak określonych parametrów strzelania prognozowana wielkość PFU wyniesie 822 Pa.

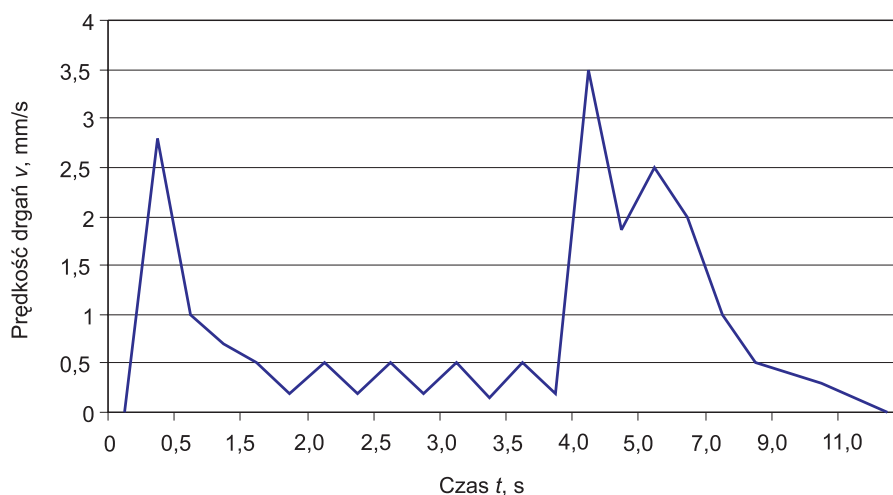
Dla określenia oddziaływania upadku powalanego obiektu zastosowano zmodyfikowany wzór Kuzniecowa [3, 7]. Energia upadku może zostać określona iloczynem masy, wysokości zawieszenia tej masy nad ziemią (środka ciężkości) oraz przyspieszenia ziemskiego. Dla znalezienia równoważnika dynamitowego energii upadku należy tę energię podzielić przez ciepło wybuchu stosowanego MW. Przy założeniu, że czas przekazywania energii upadku do podłoża wyniósłby 8 sekund, prognozowana prędkość drgań, wzbudzonych na chronionej chłodni, osiągnęłaby wartość około 3,5 mm/s.

Prognozę drgań wywołanych upadkiem przeprowadzono z uwzględnieniem następujących czynników:

- impet obalania hamowany będzie momentem wytworzonym przez wytrzymałość zbrojeń na rozrywanie oraz stopniowym pękaniem i miażdżeniem płaszcza zewnętrznego chłodni;
- czas upadania (dynamicznego kontaktu z podłożem) będzie stosunkowo długi i wyniesie około 8 s.

Ponadto czynnikiem łagodzącym jest również niska częstotliwość drgań wywołanych upadkiem. Z powyższych powodów uznano, że energia upadku nie zagrazi obiektowi chronionemu (sąsiedniej chłodni), pomimo to w czasie powalania chłodni przeprowadzono rejestrację prędkości drgań i wielkości PFU na obiektach chronionych.

Analizując przewidywany upadek wyburzanej chłodni i uwzględniając takie czynniki, jak: opóźnienia czasowe na zapalnikach, ilość MW na poszczególnych stopniach opóźnień, miażdżenie płaszcza zewnętrznego, obecność zbrojeń w płaszczu chłodni oraz czas upadku obiektu, sporządzono wykres prognozowanych drgań (wygenerowanych na chłodni chronionej) wywołanych upadkiem likwidowanej chłodni (rys. 3).



Rys. 3. Prognozowany rozkład drgań na fundamencie chronionej chłodni w czasie wyburzania chłodni nr 6

Z wykresu wynika, iż maksymalne wyładowanie energetyczne powinno nastąpić w 4. sekundzie, czyli w momencie uderzenia przedniej krawędzi chłodni o grunt, a prędkość drgań na chronionej chłodni, rzędu 3,5 mm/s, zostanie wywołana uderzeniem o grunt połowy masy chłodni [10].

Zakładając prędkość drgań na poziomie 10 mm/s, jako próg bezpieczeństwa dla obiektu chronionego, wyznaczono 50-metrową strefę zagrożenia drganiami wywołanymi upadkiem.

Jak wykazała analiza zagrożeń, najważniejszym zagrożeniem podczas obalania chłodni kominowej metodą wybuchową była powietrzna fala uderzeniowa.

Wykonane obliczenia wskazywały, iż istniało realne zagrożenie uszkodzenia obiektu chronionego (drugiej chłodni) przy inicjacji ładunków MW lontem detonującym. Użycie LD (kilkaset metrów) prowadziło do powstania zbyt dużej powietrznej fali uderzeniowej, która mogłaby doprowadzić do zawalenia sąsiedniej chłodni.

Użycie tak dużej liczby zapalników elektrycznych (3600 szt.) wymuszałoby zastosowanie kilku zapalarek do odpalenia wszystkich ładunków. Takie rozwiązanie byłoby wysoce niebezpieczne i nie było brane pod uwagę.

Z ww. powodów zaproponowano zastosowanie mieszanego systemu odpalania MW oraz zmianę kierunku obalania chłodni (wariant 2), co pozwoliło uzyskać:

- zmniejszenie PFU na chronionej chłodni,
- zwiększenie bezpieczeństwa obalania ze względu na chroniony rurociąg.

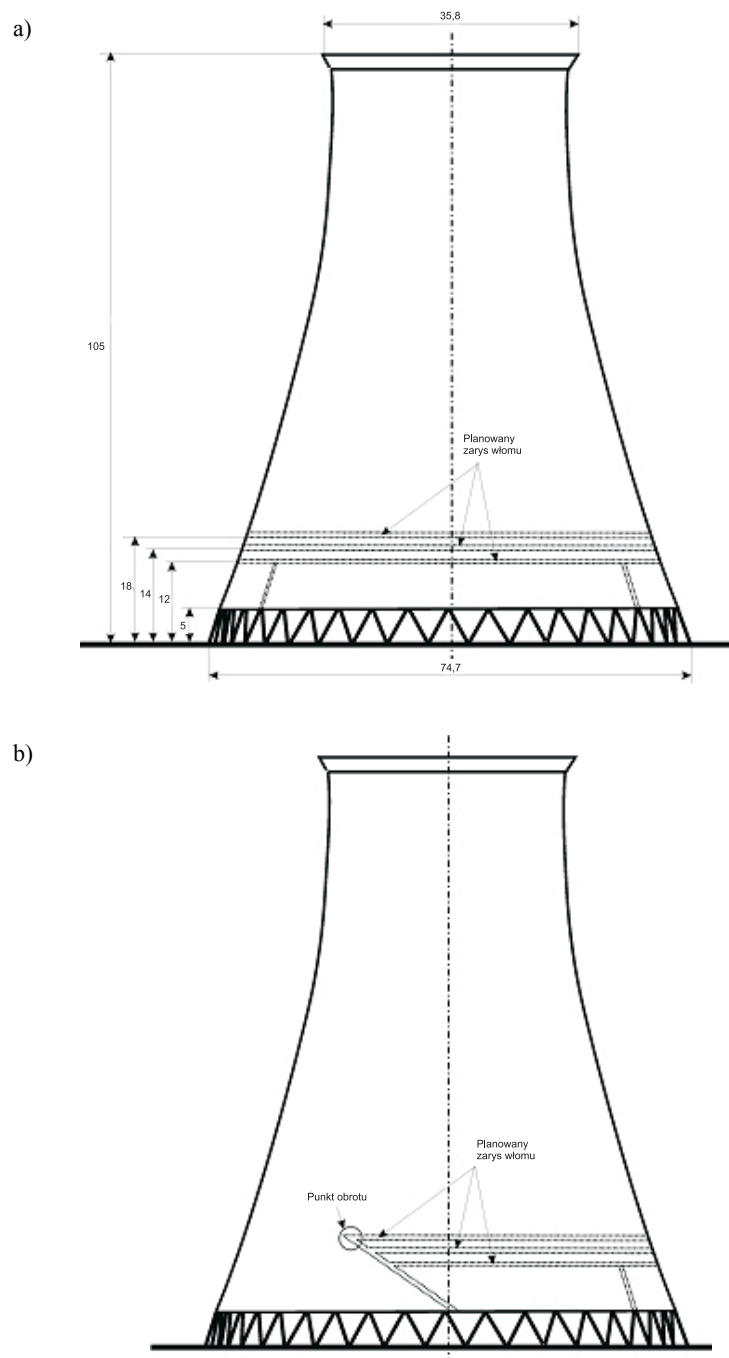
3. Technologia powalania chłodni z zastosowaniem techniki strzelniczej

Chłodnia nr 6 w elektrowni „Łagisza” była posadowiona na 46 parach słupów [10]. Kształt chłodni oraz zmienność grubości jej ścian sprawiały, że środek ciężkości płaszcza był położony stosunkowo nisko (około 40 m nad ziemią). Aby mieć pewność obalenia konstrukcji, postanowiono:

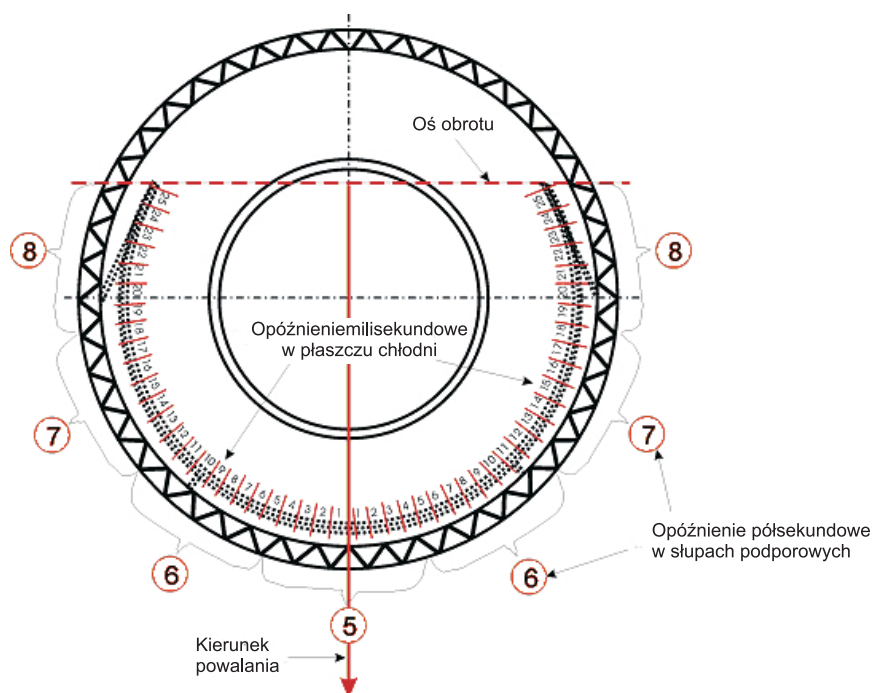
- całkowicie skruszyć 2/3 słupów podporowych;
- zdetonować trzy rzędy ładunków w otworach usytuowanych poziomo (około 1 cyklu technologicznego) na 2/3 obwodu chłodni na wysokości 12÷16 m (symetrycznie na boki od osi kierunku obalania, tak jak słupy podporowe);
- utworzyć za pomocą MW dwie bruzdy rozdzielające pionowe oraz dwie skośne od połowy do 2/3 obwodu.

Wykonanie tych operacji gwarantuje obalenie chłodni. Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono schematycznie rozmieszczenie otworów strzałowych.

Zużycie jednostkowe MW przyjęto na poziomie około 3,5 kg/m³ dla żelbetu w płaszczu chłodni, co dało ładunki około 50 g/otwór przy grubości płaszcza 12 cm, 62,5 g przy grubości do 18 cm, 80 g przy grubości do 25 cm, 100 g przy grubości do 35 cm i 125 g powyżej 35 cm. Głębokość otworów wynosiła połowę grubości płaszcza chłodni plus połowę długości ładunku; dla ścianki 12 cm było to 9,1 cm. Otwory zostały rozmieszczone centralnie w stosunku do grubości płaszcza. Sumaryczny ładunek wyniósł około 304 kg dynamitu.



Rys. 4. Likwidowana chłodnia: a) widok z przodu (z kierunku powalania), b) widok z boku



Rys. 5. Likwidowana chłodnia — widok z góry

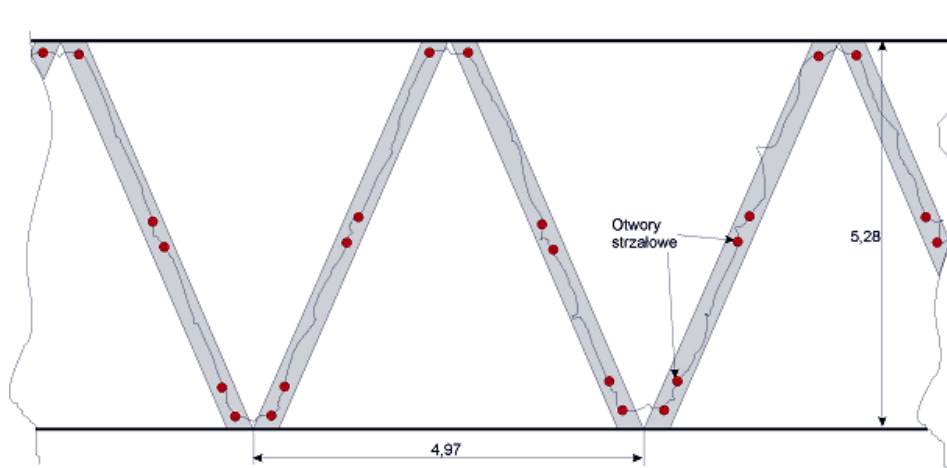
Powalenie chłodni zostało zrealizowane przy zastosowaniu zapalników UNIDET U500, odpalanych konektorami SNAPLINE (rys. 6).



Rys. 6. Sieć strzałowa (nieelektryczna) w płaszczu chłodni

Zostało wykonanych 25 sekcji czasowych, odpalanych konektorami SNAPLINE SL67. Ponadto, każda sekcja została podzielona na dwie podsekcje, różniące się czasem wybuchu o 25 ms. Dzięki temu detonacja ładunków MW została podzielona na 50 opóźnień czasowych. Czas detonacji MW w płaszczu chłodni wyniósł 1,675 s.

W słupach zastosowane zostały zapalniki elektryczne półsekundowe (60 słupów $\times$ 5 zapalników, tj. 300 sztuk zapalników półsekundowych klasy 0,2 A), o numerach od 5 do 8, co dawało czas odpalania od 2,5 do 4 s (rys. 7 i 8).

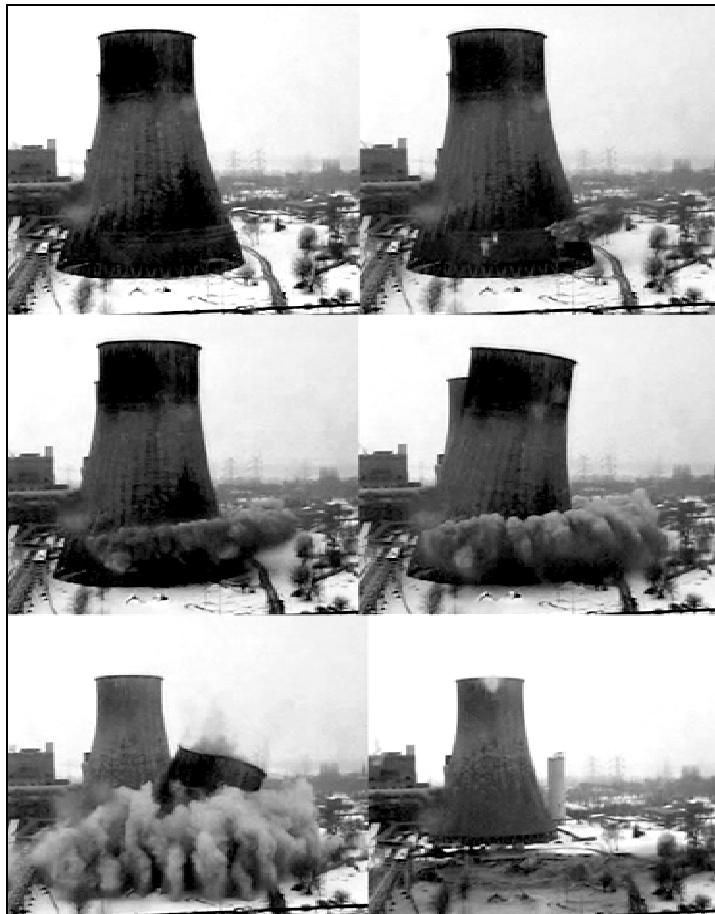


Rys. 7. Schemat rozmieszczenia otworów strzałowych w słupach podporowych



Rys. 8. Ładunki MW w słupach podporowych

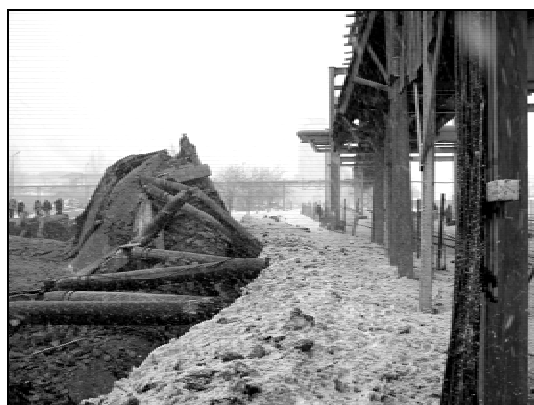
Powalanie chłodni kominowej nr 6 w Elektrowni „Łagisza” zakończyło się pełnym sukcesem (rys. 9).



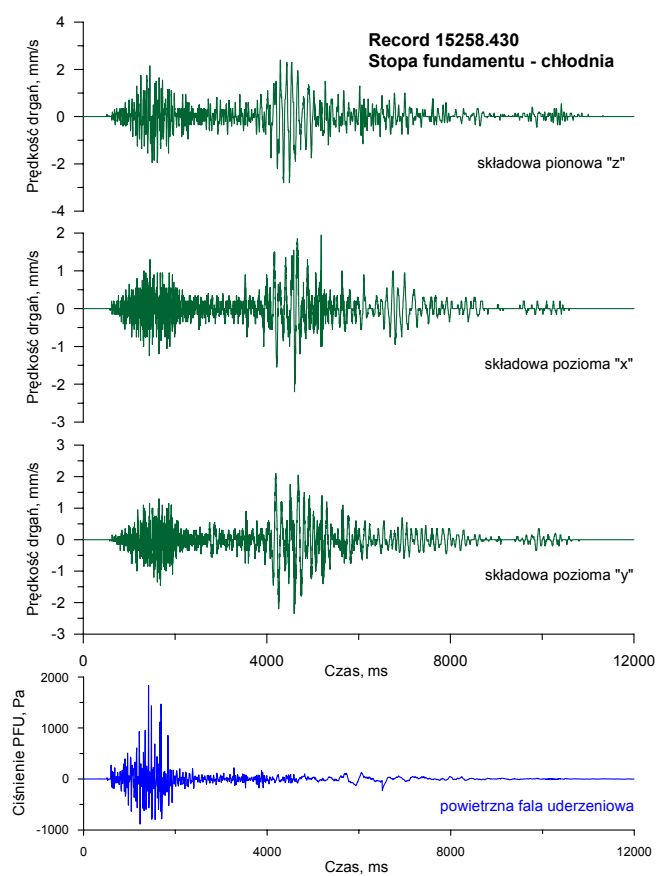
Rys. 9. Powalanie chłodni kominowej w Elektrowni „Łagisza” w Będzinie

Dzięki zastosowanej technologii nie nastąpiło cofanie się chłodni, a chroniona estakada pozostała nienaruszona (rys. 10). Zastosowanie systemu nieelektrycznego NONEL do zainicjowania ładunków MW w płaszczu chłodni zminimalizowało powietrzną falę uderzeniową.

Niemniej jednak maksymalne ciśnienie PFU zarejestrowane na sąsiedniej chłodni wyniosło 1835 Pa (rys. 11). Maksymalna zarejestrowana wartość powietrznej fali uderzeniowej mogła być związana z niestarannym wykonaniem lub brakiem przybitki w kilku otworach strzałowych. Nasuwa się oczywisty wniosek, że wykonanie przybitki podczas tego typu strzelań jest niezwykle istotne i może od tego zależeć sukces lub porażka realizacji zadania wyburzeniowego.



Rys. 10. Gruz po wyburzeniu chłodni i chroniona estakada



Rys. 11. Sejsmogram drgań parasejsmicznych i PFU, zarejestrowanych na chronionej chłodni

Maksymalna amplituda drgań wywołanych detonacją MW na chronionej chłodni wyniosła 2,15 mm/s i była mniejsza o 20% od prognozowanej (2,7 mm/s).

Największa amplituda drgań wywołanych upadkiem wyburzanej chłodni wystąpiła w 4. sekundzie (tak jak prognozowano) i wyniosła 2,8 mm/s (prognoza — 3,5 mm/s).

4. Podsumowanie

Chłodnie kominowe, jako obiekty o specyficznej budowie i równie specyficznych warunkach wytrzymałościowych, mogą być bezpiecznie i precyzyjnie likwidowane metodami strzałowymi. Przed opracowaniem sposobu likwidacji należy określić jej warunki brzegowe: jakie parametry drgań i powietrznej fali uderzeniowej są dla obiektu chronionego bezpieczne oraz jaką zastosować technologię, aby warunki bezpieczeństwa otoczenia zostały spełnione. Okazało się, że dotychczas pomijana w analizach powietrzna fala uderzeniowa jest najważniejszym zagrożeniem. Szkodliwemu działaniu PFU zapobiegano poprzez:

- zmianę kierunku obalania;
- zastosowanie mieszanych technik inicjacji;
- wydłużenie czasu trwania serii wybuchowej;
- wykorzystanie ścianek budowli wyburzanej do blokady PFU;
- koordynację w czasie przecinania płaszcza i siadania obiektu po rozstrzeleniu słupów podporowych.

Analizy i prognozy zostały potwierdzone w praktyce.

Należy rozpatrzyć możliwość zmniejszenia ilości MW i liczby otworów przez rezygnację z 2 (na 3) linii cięcia poprzecznego w płaszczu i pozostawienie tylko jednego, szerokiego pasa cięcia, umożliwiającego załamanie się chłodni i kierunkowe przechylenie, a po wspomożeniu dynamicznym (przez rozstrzelenie słupów) — powalenie niemal w miejscu, z lekkim odchyleniem w kierunku uznanym przez projektantów za najwłaściwszy.

LITERATURA

- [1] *Andrzejewski J.*: Zastosowanie techniki strzelniczej w pracach wyburzeniowych — technologia wykonywania prac, zagrożenia i metody ich ograniczenia. AGH, Kraków 1991 (praca dyplomowa)
- [2] *Batko P., Lewicki J., Morawa R.*: Metody prognozowania i minimalizacji niektórych zagrożeń przy prowadzeniu robót wyburzeniowych metodą strzałową. Materiały konferencyjne nt. Technika strzelnicza w górnictwie” Jaszowiec ‘96, CPPGSMiE PAN, Kraków 1996
- [3] *Batko P., Lewicki J.*: Technologia wyburzania metodami strzałowymi obiektów kopalnianych o skomplikowanej budowie lub w trudnej sytuacji terenowej. Materiały konferencyjne nt. Technika strzelnicza w górnictwie, Jaszowiec ‘96, GSMiE PAN, Kraków 1996
- [4] *Batko P., Lewicki J.*: Wybrane problemy likwidacji kopalnianych obiektów budowlanych. Materiały konferencyjne nt. Technika strzelnicza w górnictwie. ART-TEKST, Jaszowiec 2001
- [5] *Bohus G.*: Destruction of the hollow, thin-walled, reinforced concrete structures. Międzynarodowa konferencja nt. Trhacia Technika, Stara Leśna 2004
- [6] *Budzicz L.*: Projektowanie robót strzelniczych inżynierskich. AGH, Kraków 1986 (praca dyplomowa)

- [7] *Krzyworączka P.*: Problem drgań parasejsmicznych wywołanych upadkiem wyburzanych obiektów. AGH, Kraków 2001 (praca magisterska)
- [8] *Krzyworączka P.*: Technologia wyburzenia metodą strzałową wybranych obiektów kopalnianych. AGH, Kraków 2000 (praca dyplomowa)
- [9] *Ledwoń J., Golczyk M.*: Chłodnie kominowe i wentylatorowe. Arkady, Warszawa 1967
- [10] *Milka J., Wiencek P., Pilch A., Fus A., Ryszewski Cz., Krzyworączka P.*: Dokumentacja strzałowa wyburzenia chłodni kominowej nr 6 w Elektrowni „Łagisza” w Będzinie. Olkusz 2004 (praca niepublikowana)

Zatwierdzono do druku: 17.09.2004 r.