XXV Konferencja Naukowo-Techniczna, Międzyzdroje 24-27 maja 2011
awarie budowlane 2011

AGNIESZKA TOŁŁOCZKO, *ATolloczko@dolnaodra.com.pl*
ANDRZEJ HAAS, *AHaas@dolnaodra.com.pl*
PGE Górnictwo i Energetyka Konwencjonalna S.A.
TERESA PACZKOWSKA, *teka@ps.pl*
WIESŁAW PACZKOWSKI, *wespa@ps.pl*
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

ZNISZCZENIA SUBSTANCJI BUDOWLANEJ SPOWODOWANE WYBUCHEM PYŁU WĘGLOWEGO W ELEKTROWNI

STRUCTURAL DAMAGE CAUSED BY AN EXPLOSION OF COAL DUST IN A POWER STATION

Streszczenie Wybuch pyłu węglowego spowodował znaczne zniszczenia elementów infrastruktury budowlanej w konwencjonalnej elektrowni węglowej. Fala uderzeniowa przemieszczała się wzdłuż pomieszczeń, w których zamontowane były przenośniki taśmowe. Kumulacja fali uderzeniowej na końcach prostych odcinków jej przemieszczania się doprowadziła do zniszczenia znajdujących się tam ścian oraz dwóch budynków. W referacie dokonano analizy przyczyn wybuchu oraz przedstawiono uszkodzenia i zniszczenia wybuchem spowodowane. Przedstawiono sugestie dotyczące poprawy bezpieczeństwa elementów konstrukcyjnych elektrowni.

Abstract An explosion of coal dust caused severe damage to some structural parts of a conventional coal power station. The main track of the shock wave led along conveyors. Increase of the pressure at the end parts of the straight sectors destroyed walls and two buildings. The paper presents analysis of the explosion cause and description of the most important damages done to building elements of the power station. Some indications concerning improvement of the safety of structural components are presented.

1. Obciążenia wyjątkowe od wybuchu

Eurokod 0 [1] klasyfikuje obciążenia pochodzące od wybuchu jako oddziaływania wyjątkowe (A). Projektowanie konstrukcji i ich elementów na obciążenia wyjątkowe od wybuchu może tylko w ograniczonym zakresie ukierunkować zakres zniszczeń wywołanych falą uderzeniową. Gwałtowne oddziaływanie gazu o wysokim ciśnieniu stanowi istotę wybuchu. Rozprzestrzenia się ono we wszystkich kierunkach. Skutki wybuchu pyłu węglowego wzbogaconego ewentualnie składnikami biomasy dodawanej w procesie wytwarzania mieszaniny palnej, są nieprzewidywalne co do wartości towarzyszących obciążeń ani też co do rozmiaru zniszczeń. Zależą one w znacznym stopniu od ilości ładunku czyli pyłu nagromadzonego w przestrzeni. W przypadku pyłu węglowego przyjmuje się, iż wybuch następuje przy stężeniu minimalnym 50 g/m^3 powietrza. Poziom nasycenia 300÷500 g/m^3 stwarza optymalne warunki do wystąpienia wybuchu. Objętość wyzwalających się przy wybuchu gazowych produktów reakcji chemicznej przewyższa 700÷900 razy objętość materiału w stanie wyjściowym [3]. Nagrzane gazy dodatkowo zwiększają ciśnienie. Starający się rozszerzyć we wszystkie strony gaz stanowi podstawową siłę uderzeniową wybuchu zdolną do zniszczenia

obiektów znajdujących się w jej zasięgu. Powietrzna fala uderzeniowa jest wynikiem działania silnie ściśniętych i nagrzanych gazowych produktów reakcji wybuchu. Rozprzestrzenianie się fali uderzeniowej powoduje powstanie bardzo wysokiego ciśnienia, a jednocześnie w przypadku zalegania pyłu węglowego na znacznym obszarze podrywanie spoczywających cząstek pyłu i podtrzymywanie w ten sposób warunków sprzyjających wybuchowi.

Z punktu widzenia konstrukcji budowlanych istotne jest nadciśnienie oddziaływujące na przegrody. Do oceny jego wartości można przyjąć następujące efekty [5]:

– pękanie szyb okiennych ze szkła zwykłego: 7 kPa;
– wymagana wartość nadciśnienia przenoszonego przez ściany pomieszczeń zagrożonych wybuchem: 15 kPa;
– nadciśnienie wywołane wybuchem gazu: 20 kPa.

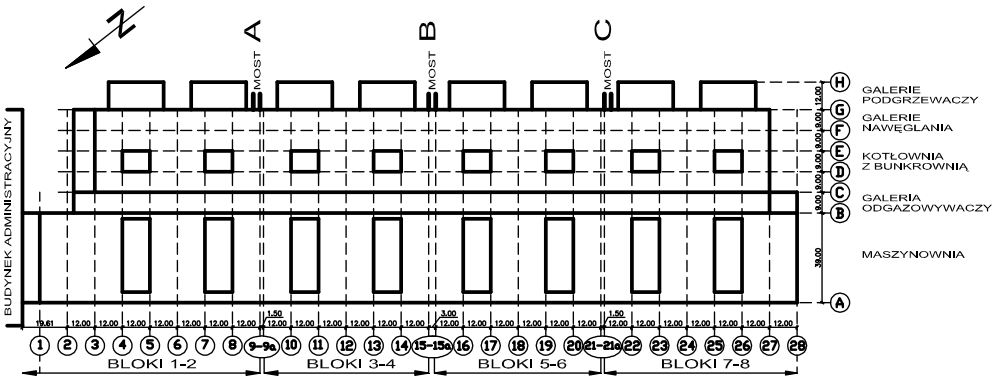
Przyjmuje się, iż współczynnik dynamiczny służący zamianie efektywnie działającego obciążenia od wybuchu na równoważne statyczne stosowane w analizie wytrzymałościowej konstrukcji budowlanych wynosi $\gamma_d = 2{,}0$.

Wybuchy są przyczyną poważnych katastrof budowlanych. We wszystkich dotychczasowych 24 edycjach konferencji „Awarie Budowlane" problematyce związanej z działaniem wybuchów na konstrukcje budowlane poświęcono 16 referatów. Z punktu widzenia omawianego tu zagadnienia istotne są publikacje dotyczące wybuchów wewnętrznych. Dwie publikacje dotyczyły wybuchu gazu, trzy – pyłów organicznych, po jednej biogazu i zanieczyszczeń tworzących mieszankę wybuchową. Wybuch pyłu węglowego kojarzony jest najczęściej z przestrzenią kopalń [3].

2. Opis obiektu

Przedmiotowa elektrownia jest konwencjonalną węglową elektrownią blokową, z otwartym układem chłodzenia. Elektrownię wybudowano w latach siedemdziesiątych, a poszczególne jej bloki przekazywano do eksploatacji w latach 1974÷1977. Łączna moc ośmiu bloków wynosi 1772 MW.

Na rys. 1 pokazano rzut poziomy budynku głównego elektrowni. Całkowita długość budynku wynosi 330 m.



Rys. 1. Układ budynku głównego z ciągami nawęglania

Między rzędami A i B znajduje się maszynownia o otwartej przestrzeni, natomiast między rzędami C i G znajduje się kotłownia mieszcząca kotły i urządzenia nawęglania, w tym galerie przenośników taśmowych, zasobniki oraz młyny węglowe. Konstrukcję nośną maszynowni stanowi halowy układ jednonawowy ze stalowymi dźwigarami kratowymi

w konstrukcji dachu. Kotłownia posiada stalową konstrukcji szkieletową ze słupami rozmieszczonymi w rzędach od C do G w regularnym rozstawie 9,0 m. Standardowy rozstaw słupów na kierunku podłużnym wynoszący 12,0 m zaburzony jest w rzędach obejmujących kotły i przy dylatacjach. Na poziomach +10,5 m, +19,5 m, +22,5 m, +25,5 m znajdują się stropy żelbetowe o różnym zasięgu. Wszystkie wyższe poziomy konstrukcyjne mają konstrukcję stalową wspierającą trakty komunikacyjne wykonane z kratek ażurowych lub pełnią rolę stężeń poziomych.

Ściany osłonowe budynku głównego zostały w ostatnich latach wymienione i wykonane są z płyt warstwowych oraz układów doświetlających z płyt poliwęglanowych. Dach zachował oryginalną konstrukcję z prefabrykowanych żelbetowych płyt panwiowych.

W procesie technologicznym elektrowni wyróżnić można dwa ciągi nawęglania: zewnętrzny i wewnętrzny. Układ umownie nazwany „ciągiem zewnętrznego nawęglania" obejmuje urządzenia i obiekty związane z transportem węgla z placu składowego do budynku kotłowni, a „ciąg wewnętrznego nawęglania" znajduje się w wydzielonych pomieszczeniach budynku głównego na poziomie +19,5 i + 22,5 pomiędzy osiami 3–27 oraz rzędami F–G.

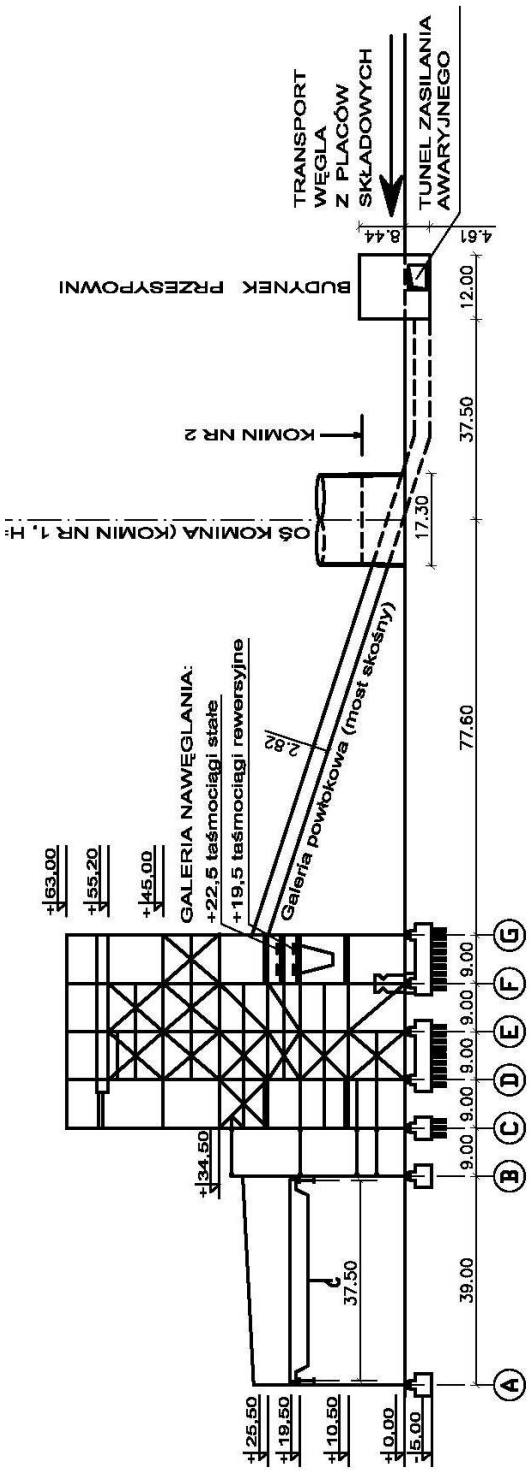
Na rys. 2 pokazano przekrój pionowy obiektu ze schematycznym zaznaczeniem głównych składników ciągu nawęglania. Węgiel z placów składowych dostarczany jest przenośnikami taśmowymi do budynków przesypowych. Następuje tutaj wzbogacenie o biomasę i rozpoczyna się transport w przestrzeniach zamkniętych. Są trzy ciągi zasilania prowadzące przez mosty skośne oznaczone na rys. 1 jako most A, most B i most C. Mosty skośne A i C prowadzą na poziom +25,5 m, natomiast most B na poziom +28,5 m. Rozprowadzenie węgla do poszczególnych bloków odbywa się w galeriach nawęglania, przy czym na poziomie +22,5 m pracują taśmociągi stałe, natomiast na poziomie +19,5 m – taśmociągi rewersyjne. Zasobniki na mieszankę paliwową usytuowane są nad stropem +10,5 m. Młyny węglowe, po pięć dla każdego kotła posadowione są na poziomie 0,00 m.

Elektrownię zaprojektowano jako elektrownię opalaną węglem. Obowiązujące obecnie przepisy nakazują stosować dodatkowy składnik w postaci biomasy, co zostało zrealizowane po wprowadzeniu stosownych modernizacji. Biomasę mogą tworzyć np. zrębki pochodzenia drzewnego. Jej średni wagowy udział wynosi 5%. Zostały przeprowadzone badania na próbkach pyłu pobranych z poziomu galerii taśmociągów rewersyjnych oraz z zasobników bloku nr 7 [2]. Badanie wybuchowości i zapalności pyłów wymagało zmielenia pobranych próbek. Uzyskano udział frakcji poniżej 75 μm na poziomie 45%. Średnicę ziaren 75 μm uważa się za granicę, poniżej której następuje największe zagrożenie wybuchem. Badania wybuchowości próbek polegały na ustaleniu minimalnej temperatury zapłonu obłoku pyłu T_{CL} [°C] oraz minimalnej temperatury zapłonu T_{5mm} [°C] warstwy pyłu o grubości 5 mm. Średnie wartości uzyskanych temperatur przedstawiono w tablicy 1.

Tablica 1. Średnie wartości parametrów wybuchowości pobranych próbek

Obszar pobrania próbek	T_{CL} **[°C]**	T_{5mm} **[°C]**
Galeria nawęglania	490	215
Zasobniki	595	>400

Podane wartości są istotne z punktu widzenia oceny zagrożenia wybuchem na skutek temperatur generowanych w urządzeniach występujących w ciągach nawęglania.



Rys. 2. Przekrój pionowy głównego ciągu nawęglania

3. Przebieg zdarzenia

Do wybuchu doszło w okresie trwającej od trzech tygodni śnieżnej i mroźnej zimy. W dniu wybuchu temperatura wynosiła -15°C. Analiza zapisów automatyki kontrolno-pomiarowej potwierdzona zeznaniami świadków, analizą obrazów z kamer przemysłowych oraz przeglądem stanu konstrukcji pozwoliła na ustalenie miejsca inicjacji wybuchu [4]. Proces rozpoczął się w jednym z młynów węglowych kotła nr 7. W zasobniku dostarczającym do młyna mieszankę węgla i biomasy doszło do powstania „zawisu" powodującego chwilowy zanik lub znaczne ograniczenie strumienia paliwa w systemie nawęglania. Układ automatyki sterowania zareagował zwiększeniem parametru zadanej mocy, co spowodowało zwiększenie temperatury powietrza w młynie. Znajdująca się w młynie wysuszona mieszanina drobnozmielonego pyłu węglowego i pyłu z biomasy o większych wymiarach ziaren lecz niższej temperaturze zapłonu uległa zapłonowi. Przedmuch ze strony młyna dostarczył do wnętrza zasobnika niezbędnego do spalania powietrza, co spowodowało pożar w jego wnętrzu oraz ponad nim. Wytworzona mieszanina wybuchowa uległa zapłonowi, który początkowo rozszerzał się deflagracyjnie, czyli z prędkością mniejszą od prędkości dźwięku w powietrzu. Narastanie prędkości w układzie technologicznym doprowadziło do przyspieszenia fali uderzeniowej i przejścia w detonację. Właściwości procesu zachodzącego na froncie płomienia oraz w całej strefie reakcji doprowadziły do wytworzenia różnicy ciśnień. Jej efektem było zassanie ścianek rur instalacji technologicznej do wnętrza na początkowym odcinku działania wybuchu oraz na odcinkach końcowych kumulacji ciśnienia. Fala uderzeniowa przemieszczała się na poziomach +19,5 m i +22,5 w galeriach nawęglana między rzędami F i G wzdłuż budynku głównego w obu kierunkach powodując znaczne zniszczenia. Przeskok na poziom +25,5 m nastąpił w stacjach napędowych mostów skośnych A i C, skąd proces wybuchowy został przeniesiony galeriami powłokowymi mostów skośnych i dalej wzdłuż przenośników taśmowych przechodzących przez podstawy kominów i tuneli podziemnych do budynków przesypowni ciągu A i ciągu C. Tu nastąpiło spiętrzenie fali uderzeniowej powodujące poważne zniszczenia.

Wzrost wewnętrznego ciśnienia w budynku głównym spowodował także lokalne uszkodzenia ścian osłonowych w rzędach A i C.

4. Zakres zniszczeń

Zniszczenia elementów budowlanych spowodowane wybuchem pyłu węglowego były znacznie mniejsze w obszarze wewnętrznego ciągu nawęglania od tych, jakich doznał zewnętrzny ciąg nawęglania. Zniszczenia w obszarze wewnętrznego ciągu nawęglania na obu poziomach galerii objęły przede wszystkim:

- murowane ściany wewnętrzne o gr. 12 cm oddzielające galerię +19,5 m od urządzeń kotłowni wzdłuż rzędu „F";
- lokalnie wyrwane falą podmuchu warstwowe ściany zewnętrzne znajdujące się w rzędzie „G", które były mocowane do słupów układu nośnego budynku kotłowni;
- doświetlenia z płyt poliwęglanowych występujące we wschodniej i częściowo zachodniej i północnej ścianie kotłowni (rys. 3);
- mury, pokrycie i ściany osłonowe wydzielające w budynku kotłowni pomieszczenia stacji napędowych mostów skośnych „A" i „C" znajdujące się na poziomie +25,5 m (rys. 4);
- instalacje wodne zlokalizowane w obszarze galerii na obu wskazanych wyżej poziomach;
- częściowo instalacje wentylacji i elektryczne w obszarze wewnętrznej galerii nawęglania na obu poziomach.

Rys. 3. Uszkodzenia ściany osłonowej w rzędzie C

Rys. 4. Wyrwana obudowa stacji napędowej mostu skośnego A

W obszarze tzw. zewnętrznego ciągu nawęglania skutki wybuchu były znacznie poważniejsze i objęły:

- całkowite zniszczenie części nadziemnych dwóch budynków przesypowni: w ciągu „A” (rys. 5) i w ciągu „C” (rys. 6);
- nienaprawialne uszkodzenia żelbetowej konstrukcji podziemnej budynku przesypowego „A”;
- w części przyziemnej główne tunele transportowe i dochodzące do nich prostopadle tunele awaryjne o konstrukcji żelbetowej dochodzące do ciągu nawęglania „A;
- w ciągu „A” wszystkie murowane ściany wewnętrzne w obszarze tunelu znajdującego się bezpośrednio pod kominem;
- stropową płytę żelbetową przekrywająca luk montażowy w kominie, która była osadzona nad tunelem przenośnika taśmowego na poziomie +7 m;

Rys. 5. Całkowicie zniszczony budynek przesypowy w ciągu nawęglania A

Rys. 6. Całkowicie zniszczony budynek przesypowy w ciągu nawęglania C

– szklenia okien w obszarze mostów skośnych A i C;
– w moście skośnym „C” zniszczeniu uległa taśma transportowa przenośnika wraz z częścią rolek prowadzących;
– w efekcie pożaru pierwotnego i wtórnego, który pojawił się ok. 5 godz. po wybuchu w moście „C” zniszczeniu uległy instalacje wewnętrzne.

Miarą skali wydarzenia mogą być odległości między miejscami, w których doszło do zniszczeń lub uszkodzeń. Przykładowo, odległość w linii prostej między dwoma całkowicie zniszczonymi budynkami przesypowni w ciągu A i C wynosi 145,60 m. Tymczasem odległość funkcjonalna rozumiana jako najkrótsze możliwe połączenie przez wspólne zamknięte

przestrzenie pozwalające na dotarcie z jednego obiektu do drugiego wynosi 403,40 m. Największa odległość w linii prostej między miejscem wybuchu a najdalszymi odnotowanymi uszkodzeniami wewnątrz samego budynku głównego wynosiła 291,80 m.

5. Wnioski końcowe

Poza zakresem kompetencyjnym specjalistów w dziedzinie budownictwa pozostaje cała kwestia zapewnienia bezpieczeństwa przeciwwybuchowego w obiektach narażonych na wybuch, w tym na wybuchy pyłu węglowego lub węglowo-drzewnego. W szczególności istotne jest tu niedopuszczanie do przekroczenia dolnej granicy stężenia pyłu w powietrzu oraz minimalizowanie oddziaływania efektywnych źródeł zapłonu. Obraz zniszczeń substancji budowlanej, jakie wystąpiły w opisanym przypadku pozwala natomiast na sformułowanie uwag w sprawie stosowania rozwiązań konstrukcyjnych, które służyłyby ograniczeniu skutków wybuchu. Zarówno w fazie projektowania jak i ewentualnych późniejszych przebudów i zmian istniejących rozwiązań powinno się dążyć do wyraźnego rozdzielenia funkcji nośnych, które powinny zostać zachowane w warunkach obciążenia wybuchem oraz funkcji osłonowych, które w warunkach wybuchu powinny zadziałać jako elementy osłabiające energię fali uderzeniowej. Opracowanie systemu elementów osłonowych zapewniających właściwą pracę w warunkach eksploatacji zgodnej z założeniami technologicznymi, a jednocześnie poddających się działaniu obciążeń wyjątkowych od wybuchu byłoby zgodne z zasadą określoną w [1] a wymagającą, by uszkodzenia konstrukcji nośnej nie wystąpiły w zakresie nieproporcjonalnym do początkowej przyczyny. Można stwierdzić, iż w opisanym przypadku skutecznie zadziałały nowoczesne elementy ścian osłonowych, których wymiany dokonano w ostatnich latach. Znaczna liczba płyt warstwowych oraz wielkopowierzchniowych doświetleń z płyt poliwęglanowych została wyrwana powodując istotne zmniejszenie oddziaływania na konstrukcję nośną. Obiekty pochodzące z okresu budowy elektrowni znajdujące się na końcowych odcinkach kumulacji nadciśnienia zostały natomiast całkowicie zniszczone (budynki przesypowni) lub poważne uszkodzone, jak to miało miejsce w przypadku monolitycznych stropów żelbetowych w tunelach zasilania awaryjnego. Stosowanie systemów odpowietrzenia i tłumienia fali uderzeniowej, właściwe wzmocnienia konstrukcyjne oraz separacja urządzeń i obszarów stanowić może racjonalne podejście do ograniczania skutków wybuchu.

Literatura

1. PN-EN 1990:2004 Eurokod – Podstawy projektowania konstrukcji.
2. Wykonanie badań własności zapalnych prób pobranych z rejonu zasobników oraz analiza możliwości poprawy bezpieczeństwa przeciwwybuchowego w linii nawęglania Elektrowni. Główny Instytut Górnictwa. Kopalnia Doświadczalna „Barbara” w Mikołowie, 2010.
3. Raport Wyższego Urzędu Górniczego „Zagrożenie związane z wybuchem pyłu węglowego”. Katowice 2007.
4. Ekspertyza z czynności dochodzeniowych przyczyn powstania wybuchu. Izba Rzeczoznawców SITP, Warszawa 2010.
5. Bednarek Z.: Analiza zagrożeń występujących w pomieszczeniach zagrożonych wybuchem oraz metody ograniczania ich skutków. Inżynieria i Budownictwo, nr 7/1996.