



JOLANTA A. PRUSIEL, *j.prusiel@pb.edu.pl*

ANDRZEJ ŁAPKO, *lapko@pb.edu.pl*

Politechnika Białostocka

## OCENA ZAGROZEŃ EKSPLOZJĄ PYŁÓW W SILOSACH W ŚWIETLE NORM EUROPEJSKICH

### ASSESSMENT OF DUST EXPLOSION IN SILO STRUCTURES IN THE LIGHT OF EUROPEAN CODES

**Streszczenie** W pracy omówiono podane w Eurokodzie 1 część 4 zasady oceny zagrożeń związanych z przechowywaniem w silosach materiałów sypkich, których pyły posiadają właściwości eksplozyjne. Powołując się na przykłady katastrof silosów spowodowanych wybuchami zwrócono uwagę na sposoby projektowania silosów z uwzględnieniem zabezpieczeń, takich jak klapy bezpieczeństwa i czujniki, umożliwiających przeciwdziałanie wybuchom.

**Abstract** On the basis of Eurocode 1-4 recommendations the paper discusses the gist of the dust explosion in silos designed for storing of a particulate solids having the explosive dust properties. Analysing the numerous examples of catastrophes the authors pay attention on the technical equipment preventing explosions like explosion doors, sensors and deflectors.

#### 1. Wprowadzenie

Wybuchy pyłów należą do częstych przyczyn awarii, a nawet katastrof silosów żelbetowych i stalowych. Czynnikiem inicjującym to zjawisko jest unosząca się wewnątrz komory mieszanina pyłu i powietrza oraz jej kontakt ze źródłem ciepła w postaci gorących powierzchni lub iskier z instalacji elektrycznej. Przyczyną wybuchu może być też znaczna ilość ciepła wydzielającego się z żarówek oświetleniowych. Jako temperaturę zapłonu uważa się  $400\div 500^{\circ}\text{C}$ , a jako dolną granicę wybuchowości przyjmuje się ilość pyłu unoszącego się w powietrzu, wynoszącą  $20\text{ g/m}^3$ . Górną granicę stanowi stężenie sięgające  $1000\text{ g/m}^3$  i odnosi się ona do pyłów mąki. Wartość ciśnienia w silosie, występująca podczas wybuchu pyłu składowanego materiału w połączeniu z powietrzem, jest zależna od rodzaju materiału, stopnia stężenia pyłów i energii ich zapłonu, a także formy zastosowanych zabezpieczeń silosów, np. w postaci klapy bezpieczeństwa. Warunki sprzyjające wybuchom i samozapaleniu się zboża w silosach zbożowych stwarza rozwój drobnoustrojów i bakterii w wilgotnej masie przechowywanego materiału, co ma miejsce wskutek przemian biochemicznych, związanych ze znacznym wydzielaniem się ciepła i wilgoci. Stwierdzono, że krytyczna wilgotność ziarna, której towarzyszy intensywne wydzielanie się ciepła, zawiera się w przedziale  $14\div 15\%$ .

Eksplozja pyłów w silosie jest zjawiskiem niezwykle złożonym i zawsze niebezpiecznym. Pojawiające się gwałtownie nadciśnienie o wartościach nawet  $150\div 200\text{ kPa}$  powinno być zwykle przejmowane przez klapy bezpieczeństwa, o odpowiednio dużej powierzchni w stosunku do przekroju poprzecznego komory. Nadciśnienie wywołuje naprężenia rozciągające, które przejmowane są przez ściany i przekrycie silosu. Z kolei występujące

potem podciśnienie w komorze (o wartości zmniejszonej do  $60\div 70\%$ ), wywołuje groźne w skutkach w silosach stalowych ściskanie obwodowe. Dlatego tak ważnym zagadnieniem z punktu widzenia bezpiecznej eksploatacji cienkościennych, stalowych silosów jest instalacja czujników umożliwiających stały pomiar temperatury, jak również wentylacja wnętrza zbiornika powietrzem o odpowiedniej wilgotności.

Analizując omówione w literaturze technicznej liczne przykłady katastrof silosów wywołanych wybuchami pyłów [1], [2], [3], w niniejszej pracy omówiono główne przyczyny występujących zagrożeń, a także scharakteryzowano zawarte w Eurokodzie 1-4 [4] i innych normach europejskich [5], [7] zasady i reguły rozwiązań projektowych i technologicznych w celu przeciwdziałania takim zagrożeniom.

## 2. Omówienie zakresu ryzyka eksplozji pyłów w silosach i przykłady katastrof

Podczas wybuchu pyłów ośrodków sypkich zwykle składowanych w silosach, można się spodziewać wytworzenia w zamkniętych strefach bez wentylacji ciśnienia wybuchu rzędu 8 do 10 barów.

Siła i gwałtowność wybuchu pyłów zależy od następujących czynników:

- fizyczne i chemiczne właściwości pyłów,
- stężenie pyłu w mieszance pyłowo-powietrznej,
- jednorodność i turbulencja mieszaniny pyłowo-powietrznej,
- rodzaj energii i umiejscowienie źródła zapłonu,
- geometria zbiornika,
- temperatura, ciśnienie i wilgotność wybuchowej mieszaniny pyłowo-powietrznej.

Do podstawowych parametrów związanych z wybuchem pyłów zalicza się [4]:

- zawartość pyłów  $K_{ST}$  (maksymalny czasowy przyrost ciśnienia),
- maksymalne nadciśnienie  $p_{max}$ .

Wybuchy pyłów w silosach są możliwe zarówno w materiałach organicznych, jak i nieorganicznych. Najbardziej wybuchowe pyły pochodzą z takich materiałów jak: celuloza, nawozy sztuczne, mączka kamienna, pasze dla zwierząt, guma, zboże, drewno, pył z drewna, pył węglowy, materiały syntetyczne, ziarno mielone, mączka kukurydziana, śruta, mąka ryżowa, mąka pszenna, mleko w proszku, papier, pigment, mąka sojowa, produkty czyszczące, cukier. W tabl. 1 zamieszczono dla wymienionych materiałów wartości maksymalnego przyrostu ciśnienia  $K_{ST}$  i maksymalne nadciśnienie wybuchu  $p_{max}$ , natomiast w tabl. 2 podano minimalne temperatury samozapłonu, energię wybuchu i minimalne stężenie pyłu w przestrzeni silosu, wystarczające do zainicjowania wybuchu.

Zazwyczaj wystarcza źródło niewielkiej energii do zainicjowania wybuchu w wymienionych wyżej rodzajach pyłów. Typowe źródła zapłonu w silosie lub w pomieszczeniach i instalacjach przyległych do silosu to [4]: gorące powierzchnie, generujące tarcie wywołane przez uszkodzone mechanizmy, iskry ze spawania, ścieranie lub cięcie metali podczas prac naprawczych, żarzący się popiół, wprowadzany do silosu z materiałem sypkim, iskry z ciał obcych, niewłaściwe lub uszkodzone instalacje elektryczne (na przykład oprawy punktów świetlnych), wydzielanie się ciepła podczas procesu suszenia a także samozapłon spowodowany ładunkami elektryczności statycznej.

Liczne przykłady z okresu lat 1911÷2004 awarii i katastrof spowodowanych wybuchami pyłów w silosach można znaleźć m.in. w pracy [1]. Na rys. 1 zaprezentowano rezultat katastrofy baterii żelbetowych silosów na zboże w wyniku czego całkowitemu zniszczeniu uległ strop nadkomorowy.



Rys. 1. Przykład zniszczonego w wyniku wybuchu pyłów stropu nadkomorowego w baterii silosów zbożowych

Tablica 1. Wartości maksymalnego przyrostu ciśnienia i maksymalne nadciśnienie wybuchu dla wybranych materiałów najczęściej składowanych w silosach

<b>Materiał syпки</b>	<b><math>K_{ST}</math> [bar m/s]</b>	<b><math>p_{max}</math> [bar]</b>
Węgiel brunatny	180	10
Celuloza	270	10
Mąka	140	8
Guma, kauczuk	140	9
Zboże	130	9
Drewno, pył drzewny	220	10
Kawa	90	9
Kukurydza	120	9
Mąka kukurydziana	210	10
Żyto	100	9
Mleko w proszku	160	9
Pasza dla zwierząt	40	8
Papier	60	9
Pigment	290	10
Mąka sojowa	120	9
Węgiel	130	9
Cukier	150	9
Produkty czyszczące	270	9

Tablica 2. Pyły pochodzenia rolniczego i ich parametry dotyczące wybuchu pyłów

Pył palny	Temperatura samozapłonu [°C]		Minimalna energia zapłonu [mJ]	Minimalne stężenie wybuchowe [g/m <sup>3</sup> ]
	warstwa	obłok	obłok	obłok
Skrobia (pszenica)	380	400	25	25
Orzechy ziemne (łuski)	210	460	50	45
Pszenica	220	500	60	65
Drewno/sosna (trociny)	260	470	40	35
Bawełna – surowiec	520	-	100	190
Celuloza	270	480	80	55
Mąka	440	440	60	50
Skrobia kukurydziana	-	380	30	40
Mleko w proszku	200	490	50	50
Kora dębu korkowego	210	460	35	35
Słód	250	400	35	55
Soja (mąka)	340	550	100	60
Cukier	400	370	30	45

### 3. Europejskie wytyczne projektowania silosów na wybuchy pyłów

W normie europejskiej PN-EN1991-4:2008 [4] określono podstawowe zasady projektowania silosów na wybuchy pyłów. Konsekwencje wybuchu pyłów w silosach należy ograniczać poprzez przyjęcie odpowiednich środków zapobiegawczych na danym etapie projektowania, np. poprzez wprowadzenie barier przeciwwybuchowych w taki sposób, jak w przypadku ścian przeciwpożarowych.

Indywidualne rozwiązania w strefach obiektu pomiędzy barierami zazwyczaj powinny być projektowane przy spełnieniu dwu następujących warunków:

- przy braku wentylacji, należy uwzględnić możliwość stawienia oporu przeciwko maksymalnemu ciśnieniu wybuchu  $p_{\max}$ ,
- gdy zastosowano odpowiednią wentylację, należy uwzględnić możliwość stawienia oporu przeciwko zredukowanej wartości ciśnienia wybuchu  $p_{\text{red}}$ .

Obliczeniowa wartość zredukowanego ciśnienia  $p_{\text{red}}$  zależy od rodzaju pyłu, wymiarów przestrzeni wentylowanej, początkowego ciśnienia uwolnionego  $p_a$  i bezwładności systemu wentylacji.

Projekt uwzględniający konsekwencje wybuchu powinien uwzględniać efekty wyrzutu gazów lub ognia z otworu wentylacyjnego. Ogień ten nie powinien wywołać uszkodzenia w otoczeniu, ani też zainicjować wybuchu w strefach przyległych do silosu.

Projekt powinien uwzględniać ograniczenie zagrożenia personelu wywołane kawałkami rozbitego szkła lub innych elementów konstrukcyjnych. Tam, gdzie to możliwe, otwory wentylacyjne powinny być wyprowadzone wprost na otwartą przestrzeń, co zredukuje ciśnienie wybuchu. W wolno stojącym silosie może to być osiągnięte poprzez zastosowanie dachu wentylowanego. W silosach zablokowanych na ten cel może być wykorzystana klatka schodowa lub okna umieszczone wysoko powyżej poziomu terenu.

System wentylacyjny powinien być uruchamiany przy małym ciśnieniu i mieć małą bezwładność.

Przy obliczaniu elementów konstrukcyjnych w silosach narażonych na wybuchy ciśnienie obliczeniowe przy wybuchu należy traktować tak jak obciążenia wyjątkowe działające na wszystkie elementy konstrukcyjne. W związku z tym wszystkie nośne elementy konstrukcyjne i wszystkie elementy pomyślane jako bariery przeciwybuchowe należy projektować na przeniesienie związanego z wybuchem pyłów ciśnienia obliczeniowego.

Ponadto w projektowaniu należy uwzględnić siły bezwładności wynikające z gwałtownego wyrzutu gazu, które w następstwie ochładzania się gorących spalin mogą powodować podciśnienie.

Wszystkie istotne części urządzeń wentylacyjnych należy osłaniać przed oderwaniem w konsekwencji fali ciśnienia wybuchu, np. należy zaprojektować zamocowania drzwi przeciwybuchowych oraz pokryw urządzeń wentylacyjnych za pomocą specjalnych uchwyty.

Gdy stosuje się wentylację komór silosowych, w projektowaniu systemów wsporczych muszą być uwzględniane siły reakcji. Jest to zwłaszcza istotne w przypadku lekkich konstrukcji silosów z poziomymi kanałami wentylacyjnymi, a także w przypadkach wszelkich układów wentylacji, które nie są umieszczone symetrycznie w przekroju poprzecznym silosu.

W projektowaniu silosów na wybuchy pyłów należy stosować procedury podane w PN-EN 26184-1 – Systemy ochrony przeciwybuchowej – wyznaczanie wskaźników wybuchowości pyłów palnych w powietrzu. Można także wykorzystać procedury opisane w Raporcie DIN 140 – Design of silos for dust explosion [6].

#### 4. Rozwiązania techniczne zabezpieczeń przed eksplozją pyłów

Konieczność jednoczesnego wystąpienia mieszaniny wybuchowej i źródła zapalenia oraz przewidywanie skutków wybuchu prowadzą do podstawowych zasad zapobiegania wybuchowi lub ograniczenia jego skutków w przestrzeni, w której do niego dochodzi. Należą do nich:

- zapobieganie powstawaniu mieszanin wybuchowych, np. usuwanie substancji tworzących mieszaniny wybuchowe przez wentylację,
- zapobieganie powstawaniu jakiegokolwiek efektywnego źródła zapalenia,
- ograniczenie skutków wybuchu już na etapie projektowania przez zastosowanie ochronnych środków konstrukcyjnych, np. lekkich dachów, wprowadzenie barier przeciwybuchowych,
- uniemożliwienie rozprzestrzeniania się wybuchu do pozostałych części obiektu (stosowanie zasuw lub przegród),
- minimalizowanie nadciśnienia związanego z wybuchem, np. poprzez stosowanie płytek bezpieczeństwa lub klap wybuchowych (rys. 2).



Rys. 2. Kłapy wybuchowe

Poniżej przedstawiono wybrane rozwiązania techniczne zabezpieczeń silosów przed eksplozją pyłów osrodków sypkich.

#### 4.1 Płytki bezpieczeństwa

Zasada działania płytek ochronnych polega na zapobieganiu wytworzenia się niedopuszczalnie wysokiego ciśnienia wewnątrz zbiornika na skutek wybuchu pyłu, przez otworzenie we właściwym czasie określonego otworu odciążającego (rys. 3).

Poniżej wymieniono zalety stosowania płytek bezpieczeństwa:

- wymagają minimum nakładów na konserwację i mogą być instalowane w prosty sposób,
- mają małą masę i włączają się natychmiast,
- zapewniają pyłoszczelne zamknięcie i mogą być montowane na różnych poziomach.



Rys. 3. Płytki bezpieczeństwa – przykładowe rozwiązania

#### 4.2 Bezpłomieniowe uwolnienie ciśnienia wybuchu

W praktyce powstaje często problem ze skierowaniem ciśnienia wybuchu do bezpiecznej strefy na zewnątrz obiektu. W takich przypadkach wydobywanie się płomieni jako źródła zapłonu dla wybuchów wtórnych musi być bezpiecznie zahamowane. Określa się to jako bezpłomieniowe uwolnienie ciśnienia wybuchu. Jest to połączenie przeciwwybuchowej płytki bezpieczeństwa i umieszczonego za nią tłumika płomieni. Tłumik płomieni zapobiega niezawodnie przebicciu się płomieni w przypadku wybuchu i eliminuje przez to źródło zapłonu dla możliwych wtórnych wybuchów poza zbiornikiem (rys. 4).

Zalety zastosowania tłumika płomieni (wybuchu tłumionego) są następujące:

- można go stosować wewnątrz obiektu, gdy odprowadzenie wybuchu do atmosfery jest niepożądane lub wręcz niemożliwe,
- zapobiega wydostawaniu się pyłów i płomieni z wentylowanych pomieszczeń,
- ma małe gabaryty w stosunku do porównywalnych konstrukcji i możliwość ponownego użycia po wybuchu przez prostą wymianę płytki bezpieczeństwa,
- charakteryzuje go prosty montaż.





Rys. 4. Przykładowe tłumiki płomieni

### 4.3 Mechaniczne przegrody – izolacja wybuchu

Izolację wybuchu pyłów poprzez zastosowanie przegrody mechanicznej stosuje się w celu, ochrony instalacji przed rozprzestrzenianiem się eksplozji pyłów. Zalety zastosowanego zabezpieczenia są następujące:

- zagwarantowana mechaniczna przegroda podczas wybuchu pyłów,
- szybkie działanie (zasuwki zamykają się w ciągu milisekund po wykryciu wybuchu i zapobiegają rozprzestrzenianiu się ciśnienia i płomieni w silosie),
- konstrukcja zasuw działa w obie strony przewodu,
- otwarta zasuwka daje wolny, nieograniczony przepływ bez strat ciśnienia.

### 4.4 Czujniki wybuchu

Wymienione wcześniej środki bezpieczeństwa są to bierne środki zabezpieczania, gdyż tylko zmniejszają lub tłumią skutki wybuchu. Natomiast do czynnych (aktywnych) środków zapobiegawczych należą między innymi czujniki wybuchu (rys. 5). Czujniki wybuchu – są to urządzenia, których zadaniem jest jak najwcześniejsze sygnalizowanie zagrożeń.

a)



b)



Rys. 5. Czujniki wybuchu: a) optyczne, b) ciśnieniowe

Do niezawodnego wykrycia wybuchu muszą być dobrane i użyte czujniki, które mogą reagować w ciągu kilku milisekund. Są to:

- czujniki monitorowania temperatury,
- systemy gaśnicze i wykrywania iskier,
- czujniki optyczne (do stosowania w zamkniętych przestrzeniach bez dostępu światła dziennego),
- czujniki ciśnieniowe (identyfikacja narastania ciśnienia wybuchu, w jego wczesnej fazie,

co umożliwia aktywację systemu zabezpieczenia przeciwwybuchowego).

Najczęściej stosowane są czujniki ciśnieniowe, które przełączają się przy niskich ciśnieniach zadziałania (czujniki statyczne), lub które mierzą wzrost ciśnienia w funkcji czasu w urządzeniu i przy przekroczeniu z góry ustawionej wartości dają sygnał do sterowania układem (czujniki dynamiczne). Czujniki te reagują bardzo szybko i są odporne na działanie przemysłowych warunków otoczenia, jak również na powstające nadciśnienia.

## 5. Podsumowanie

Według statystyk światowych wybuchy pyłów ośrodków sypkich składowanych w silosach należą do najczęstszych przyczyn awarii lub katastrof w silosach. Dotyczy to zwłaszcza silosów na ośrodki organiczne, na przykład zboża, czy cukier. Wynika to stąd, że pyły takich materiałów sypkich mogą wybuchnąć już przy niewielkim ich stężeniu w powietrzu. Projektowanie silosu na takie media, zgodnie z wymaganiami norm europejskich, w tym Eurokodu 1-4 [4] wymaga wnikliwego przeanalizowania ciśnienia wybuchu i zastosowania otworów wentylacyjnych w stropach nadkomorowych, a także rozważenia zastosowania płytek bezpieczeństwa lub klap wybuchowych wspomaganych przez czujniki wybuchu i tłumiki ciśnienia.

## Literatura

1. Tasneem Abbasi, S.A. Abbasi.: Dust Explosions – Cases, causes, consequences and control. Elsevier B.V., Nov. 2006.
2. Martens P.: Silo-Handbuch. Wilhelm Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, Berlin 1988.
3. Kobiak J., Stachurski W.: Konstrukcje Żelbetowe. Tom 4, Arkady, Warszawa 1991.
4. PN-EN 1991-4:2008 Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Część 4: Silosy i zbiorniki.
5. PN EN 26184-1. Systemy ochrony przeciwwybuchowej – wyznaczanie wskaźników wybuchowości pyłów palnych w powietrzu.
6. Raport DIN 140. Design of silos for dust explosion. Wyd. Bayer Verlag, 2005
7. DIN 1055 Teil 6: Lastennahmen für Bauten, Lasten in Silozellen. Mai 1987.