

st. kpt. mgr inż. Rafał POROWSKI,
 mł. bryg. mgr inż. Daniel MAŁOZIĘĆ
 Zespół Laboratoriów Procesów Spalania i Wybuchowości
 Centrum Naukowo-Badawcze Ochrony Przeciwpożarowej
 Państwowy Instytut Badawczy

ZAGROŻENIE WYBUCEM PYŁÓW PALNYCH ORAZ METODY ZAPOBIEGANIA

Dust explosion hazards and prevention methods

Streszczenie

W artykule tym dokonano analizy zagrożenia wybuchem stwarzanego przez pyły palne stosowane w zakładach przemysłowych. Opisano również kilka zaistniałych w przemyśle wybuchów mieszanin pyłowo-powietrznych. Zaprezentowano również podstawowe informacje w zakresie teorii wybuchów mieszanin pyłowo-powietrznych. Następnie dokonano opisu metod badawczych umożliwiających przeprowadzanie testów w zakresie wybuchowości mieszanin pyłowo-powietrznych wraz z zaprezentowaniem stanowisk badawczych, którymi dysponuje Zespół Laboratoriów Procesów Spalania i Wybuchowości w CNBOP-PIB. Artykuł kończy opis stosowanych w przemyśle metod zapobiegania wybuchom pyłów, w tym przede wszystkim tłumienia wybuchów oraz odciążania wybuchów.

Summary

This paper presents an analysis of dust explosion hazards in the process industries. It includes a case study of several dust explosions in the process industries. We described some fundamental aspects on the theory of dust explosions. We also outlined selected testing methods of dust explosibility, including a presentation of experimental stands used by Combustion Processes and Explosion Laboratory at CNBOP-PIB. We showed well-known dust explosion prevention methods by industry, including explosion suppression and explosion venting.

Słowa kluczowe: wybuchy pyłów, zagrożenie wybuchem, metody zapobiegania, wybuchowość.

Keywords: dust explosions, explosion hazard, prevention methods, explosibility.

Wprowadzenie

Pierwszy wybuch pyłu, jaki odnotowano w światowej literaturze miał miejsce 14 grudnia 1785r. we Włoszech. Turyńska Akademia Nauki podała, że był to wybuch pyłu mąki w magazynie w centrum Turynu.

Zgodnie z zapiskami literatury w wyniku wybuchu budynku całkowicie został zniszczony. Następnie w ciągu ponad 100 lat w literaturze przedmiotu zanotowano 4 kolejne przypadki wybuchów pyłów, co przedstawia Tabela 1.

Historyczne przypadki wybuchów pyłów [1, 2].

Tabela 1.

Historic cases of dust explosions [1,2].

Table 1.

Rok	Miejsce	Instalacja	Rodzaj pyłu	Szkody
1858	Szczecin	Młyn	Zboże	Zniszczenie młynu
1860	Milwaukee (USA)	Młyn	Mąka	Zniszczenie młynu
1864	Mascoutah (USA)	Młyn	Mąka	Zniszczenie młynu
1887	Hameln (Niemcy)	Silos	Zboże	Zniszczenie silosa i kilku budynków

¹ Wkład obu autorów w powstanie artykułu równy – po 50%

Ostatni z wymienionych w Tabeli 1 przypadków miał miejsce w Niemczech w miejscowości Hameln w 1887r. Wybuch powstał w silosie zbożowym, w wyniku którego oprócz silosu zniszczeniu uległo kilka położonych w okolicy budynków. Rysunek 1 przedstawia skutki, jakie spowodował ten wybuch.



Ryc. 1. Wybuch silosa zbożowego w miejscowości Hameln w Niemczech w 1887r [1].

Fig. 1. Dust explosion in Hameln (Germany) 1887 [1].

Wybuchy pyłów palnych zdarzały i nadal zdarzają się obecnych czasach. Jako przykład drastycznego w skutkach wybuchu posłużyć może wybuch, który powstał 20 sierpnia 1997r. w miejscowości Blaye we Francji [3]. W wyniku wybuchu elewatora zbożowego śmierć poniosło 12 osób oraz jedna została ranna. Elewator zbożowy uległ w większej części zawaleniu, a budynki administracyjne zlokalizowane w pobliżu zostały całkowicie zniszczone. Rysunek 2 obrazuje częściowe skutki tego wybuchu.



Ryc. 2. Skutki wybuchu elewatora zbożowego w Blaye (Francja) w 1997 [3].

Fig. 2. Effects of dust explosion at grain elevator in Blaye (France) 1997 [3].

Kolejnym z przypadków tragicznych w skutkach wybuchów pyłów palnych, był incydent w fabryce leków West Pharmaceutical Services w miejscowości Kinston w Stanach Zjednoczonych, który miał miejsce w dniu 28 stycznia 2003r. [4]. W wyniku wybuchu śmierć poniosło 6 osób, 38 zostało rannych, a budynek fabryki uległ całkowitemu zniszczeniu, co przedstawia Rysunek 3.



Ryc. 3. Wybuch w fabryce leków w Stanach Zjednoczonych w 2003 [4].

Fig. 3. Dust explosion at pharmaceutical plant in US 2003 [4].

Podstawy wybuchowości pyłów palnych

Zjawisko wybuchów pyłów jest bardzo podobne do wybuchu gazów, jednakże mimo wszystko istnieje kilka znaczących różnic pomiędzy tymi zjawiskami [7]. Zagrożenie wybuchem pyłów w przemyśle pojawić się może praktycznie w każdym przypadku, gdzie występuje pył palny. Pyły palne stwarzają zagrożenie wybuchem poprzez:

- tworzenie się mieszanin pyłowo-powietrznych ze źródła uwolnienia pyłów palnych;
- powstanie warstwy pyłu, która może ulec zapłonowi w wyniku samonagrzewania, a następnie zapalona warstwa pyłu może odgrywać rolę źródła zapłonu do kolejnych wybuchów.

Pierwszy przypadek będzie miał miejsce w momencie, gdy rozproszony w powietrzu pył palny utworzy mieszaninę pyłowo-powietrzną w stężeniu powyżej dolnej granicy wybuchowości. Jeżeli spalający się pył zostanie rozproszony, wówczas wytworzy się jego zawiesina w powietrzu, która w obecności odpowiedniego źródła zapłonu ulegnie zapaleniu. W ten sposób powstanie wybuchowa mieszanina pyłowo-powietrzna. Ponadto, palące się cząstki pyłu mogą stwarzać potencjalne źródło zapłonu dla innych materiałów łatwopalnych znajdujących się w pobliżu. Proces wybuchu mieszaniny pyłowo-powietrznej składa się w uproszczeniu z [5]:

- transportu ciepła do powierzchni cząstki, przejmowania go przez cząstkę i jej nagrzewania;
- rozkładu termicznego powierzchni cząstki z dalszym jej nagrzewaniem oraz wydzielaniem części lotnych;
- mieszania się wydzielonych części lotnych z powietrzem wytwarzającego mieszaninę palną i jej zapaleniu;
- transportu ciepła od płomienia do sąsiednich cząstek oraz ich utlenianie i zapłon.

Drugi przypadek dotyczący zapłonu warstwy pyłu palnego, odnosi się głównie do urządzeń elektrycznych stosowanych w przestrzeniach zagrożonych wybuchem, choć nie tylko, których gorące powierzchnie stanowią po-

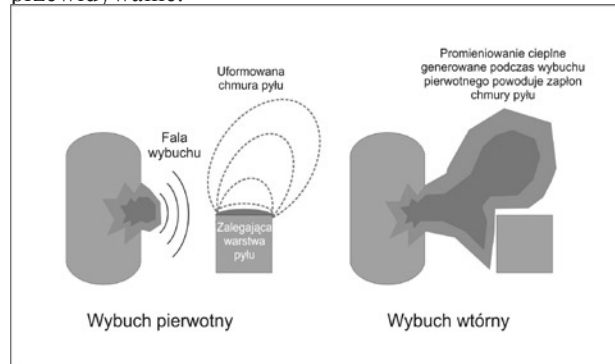
tencjalne źródło zapłonu nagromadzonych warstw pyłu. Podczas wybuchów pyłów palnych proces spalania przebiega dość gwałtownie. Szybkość rozprzestrzeniania się płomienia jest wówczas wysoka, porównywalna z szybkością wybuchu deflagracyjnego gazów. Maksymalne ciśnienie wybuchu (P_{\max}) jest często porównywalne do wartości teoretycznych (obliczeniowych), w których zakłada się, że nie występują straty ciepła podczas wybuchu.

Do tej pory nie określono jeszcze jednoznacznie, czy wybuch detonacyjny mieszanin pyłowo-powietrznych może pojawić się w warunkach przemysłowych. Szybkość rozprzestrzeniania się płomienia w mieszaninach pyłowo-powietrznych jest stosunkowo duża i w niektórych przypadkach stwierdzono, że jest zbliżona do wybuchu detonacyjnego. Jednakże większość tego typu przypadków związana jest z zagrożeniem wybuchem pyłu węglowego w kopalniach, gdzie proces ten był zainicjowany przez silne źródła zapłonu, a dodatkowo wybuch rozprzestrzenił się w przestrzeni ograniczonej [6]. Nie jest jednak na 100% pewne, czy wybuch detonacyjny mieszanin pyłowo-powietrznych może być zapoczątkowany przy słabym źródle zapłonu, które bardzo często występuje w warunkach przemysłowych.

Spośród odnotowanych i przeanalizowanych przez ekspertów wybuchów pyłowych na całym świecie [1-2], kolejność zdarzeń odnotowanych podczas zaistniałych wybuchów jest zazwyczaj następująca. Pierwotny wybuch pojawia się wewnątrz zakładu. Zastosowane tam techniczne systemy zabezpieczeń okazują się niewystarczające, aby zapobiec wydostaniu się płomieni poza zakład, zarówno podczas rozerwania np. silosu, jak również poprzez źle zaprojektowaną i wykonaną wentylację. Następuje wówczas coraz większy przepływ powietrza do spalającego się pyłu, powodując tym samym wtórny wybuch. Ilość pyłu zaangażowanego we wtórny wybuch często przekracza ilość pyłu biorącego udział w wybuchu pierwotnym. Ponadto budynek, w którym powstało zjawisko wtórnego wybuchu jest często o słabej konstrukcji budowlanej niż np. konstrukcja urządzenia, w którym pył był pierwotnie przechowywany. Należy również pamiętać o tym, że skutki wtórnego wybuchu są znacznie bardziej destrukcyjne w odniesieniu do wybuchu pierwotnego.

W niektórych przypadkach pierwotny wybuch może również pojawić się w przestrzeniach otwartych, gdzie nagromadzona jest odpowiednia warstwa pyłu, co z kolei może się również znacznie przyczynić do zjawiska wtórnego wybuchu. W pozostałych przypadkach pierwotny wybuch zazwyczaj związany jest z pojedynczym urządzeniem technologicznym w zakładzie, a następnie rozprzestrzenia się wewnątrz zakładu na kolejne urządzenia lub części instalacji technologicznej. Przykład mechanizmu powstania wtórnego wybuchu pyłowego obrazuje Rysunek 4. Możliwość powstania całkowicie destrukcyjnego w skutkach wybuchu wtórnego sprawia, że zagrożenie wybuchem pyłów nie może być do końca

przewidywalne.



Ryc. 4. Przykład powstania wtórnego wybuchu pyłowego [2].

Fig. 4. An example of secondary dust explosion phenomenon [2].

Zjawisko wybuchu pyłów może zaistnieć jedynie, gdy pył zostanie rozproszony w powietrzu, tworząc mieszaninę pyłowo-powietrzną o stężeniu w zakresie pomiędzy dolną, a górną granicą wybuchowości. W ten sposób powstanie wybuchowa chmura pyłu. Badanie charakterystyk wybuchowości mieszanin pyłowo-powietrznych stanowi fundamentalny aspekt w zakresie projektowania oraz prawidłowego doboru innowacyjnych systemów zabezpieczeń przed wybuchem, w tym przede wszystkim takich metod zapobiegania jak odciążanie wybuchów, tłumienie wybuchów, czy izolacja wybuchów. Do prawidłowego doboru tych metod zapobiegania konieczne jest poznanie najważniejszych właściwości wybuchowych pyłów palnych występujących w zakładach przemysłowych, w tym przede wszystkim:

- maksymalne ciśnienie wybuchu – P_{\max} ,
- maksymalny przyrost ciśnienia wybuchu – $(dp/dt)_{\max}$,
- dolna granica wybuchowości – DGW,
- górna granica wybuchowości – GGW,
- minimalna temperatura zapłonu warstwy pyłu – MTZ_w ,
- minimalna temperatura zapłonu warstwy pyłu – MTZ_o ,
- minimalna energia zapłonu – MEZ,
- graniczne stężenie tlenu – GST,
- klasa wybuchowości pyłu – K_{st} .

Wybuchowość mieszanin pyłowo-powietrznych określana jest poprzez parametry bardzo podobne do tych, które określają palność mieszanin gazowo-powietrznych. Jednakże istnieje pomiędzy tymi przypadkami kilka znaczących różnic. Wybuchowość pyłów można rozważyć jako wzrastający stopień stężenia wybuchowego, minimalnej temperatury zapłonu, minimalnej energii zapłonu, ciśnienia wybuchu oraz maksymalnej szybkości przyrostu ciśnienia wybuchu. Charakterystyka cząstek pyłów jest czynnością niezwykle złożoną, ale ogólnie rzecz biorąc związana jest głównie z budową cząstki, gęstością, rozmiarem, kształtem, powierzchnią, zawartością wilgoci, itp. Przykładowymi

czynnikami wpływającymi na wybuchowość pyłów są [2]:

- skład chemiczny cząstki,
- rozmiar cząstki,
- zawartość wilgoci,
- stężenie tlenu,
- obecność gazu inercyjnego,
- stężenie pyłu.

Literatura przedmiotu [1-2] przedstawia dużo dowodów i przykładów wskazujących na oddziaływanie tych czynników na właściwości wybuchowe pyłów, szczególnie dla kilku rodzajów pyłów. Jest zatem kilka grup chemicznych takich jak COOH, OH, NH₂, NO₂, C≡N, C=N, N=N, które mają skłonność do wyższych właściwości wybuchowych, a natomiast pozostałe, takie jak Cl, Br czy F mają skłonności do niższych parametrów pod względem wybuchowości. Pyły czystych metali generalnie reagują z powietrzem tworząc tlenki metali. W tym przypadku przyrost ciśnienia wybuchu powodowany poprzez wydzielanie ciepła. W niektórych przypadkach metale gwałtownie reagują z azotem tworząc azotki metali. Pyły posiadają skłonności do zmiany (polepszania) właściwości wybuchowych, nawet do 10%.

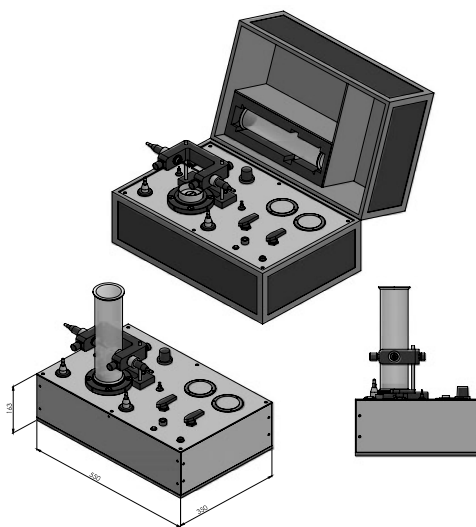
Wybuchowość pyłów jest znacznie związana z rozmiarem cząstek pyłu. Rozmiar cząstek pyłu jest zazwyczaj zamiennie określany jako ekwiwalent średnicy cząstek. Cząstki pyłów o średnicy większej niż 500 μm są mało prawdopodobnie zdolne do wytworzenia mieszaniny wybuchowej, chociaż ulegają procesowi spalania. Z drugiej jednak strony ograniczenie (zmniejszenie) rozmiaru cząstek poniżej ok. 50-74 μm nie odgrywa znaczenia w zwiększeniu się właściwości wybuchowych. Średnica cząstek pyłów wykorzystywana do badań nad właściwościami wybuchowymi pyłów zazwyczaj nie przekracza 75 μm.

Metody badawcze

W wielu krajach na całym świecie prowadzone są badania w zakresie wybuchowości pyłów. Należałoby jednak w tym miejscu rozpocząć od badań, które przeprowadziło Bureau of Mines w Stanach Zjednoczonych, które później w szerokim zakresie wykorzystywano na całym świecie, również w Polsce. Podczas testu pył zostaje rozproszony przez wtrysk sprężonego powietrza. Źródło zapłonu stanowi gorący przewód drutowy lub zapłon iskrowy. Jeśli podczas testu zaobserwuje się jakiegokolwiek rozprzestrzenianie się płomienia, to badany pył uważa się za wybuchowy. Obecnie w Zespole Laboratoriów Procesów Spalania i Wybuchowości CNBOP-PIB do wstępnej oceny wybuchowości pyłów wykorzystuje się zmodyfikowane stanowisko Hartmanna, nazwane jako demonstrator wybuchowości pyłów, co przedstawiono na Rysunku 5.

Minimalna temperatura zapłonu obłoku pyłu badana jest w piecu Godbert-Greenwalda. Zawieszona pyłu zostaje wtrącona do pionowej rury utrzymywanej w stałej temperaturze pieca. Podczas tego badania obserwuje się pojawienie się płomienia na otwartym wylocie pieca. Oddzielne oznaczenie minimalnej temperatury zapłonu stosuje się dla warstwy pyłu osiadłego, która zasadniczo różni się od

przypadku oznaczenia MTZ obłoku pyłu. W celu zbadania MTZ dla warstwy pyłu osiadłego również wykorzystywany jest piec Godbert-Greenwalda, jednakże w tym przypadku pył jest zgromadzony w koszu z siatki drucianej o średnicy 1 cala i głębokości 0,5 cala. Inną metodą stosowaną w tym zakresie jest również zapłon warstwy pyłu osiadłego od gorącej płytki, na której pył ten jest zgromadzony, według wymagań standardu PN-EN 50281-2-1 [8]. Na Rysunku 6 przedstawiono stanowisko badawcze do pomiarów minimalnej temperatury zapłonu warstwy pyłu, stosowane w CNBOP-PIB.



Rys. 5. Stanowisko badawcze do wstępnej oceny wybuchowości pyłów, stosowane w CNBOP-PIB.

Fig. 5. Experimental stand for preliminary assessment of dust explosibility at CNBOP-PIB.



Ryc. 6. Stanowisko badawcze do pomiarów minimalnej temperatury zapłonu warstwy pyłów wg PN-EN 50281-2-1 w CNBOP-PIB.

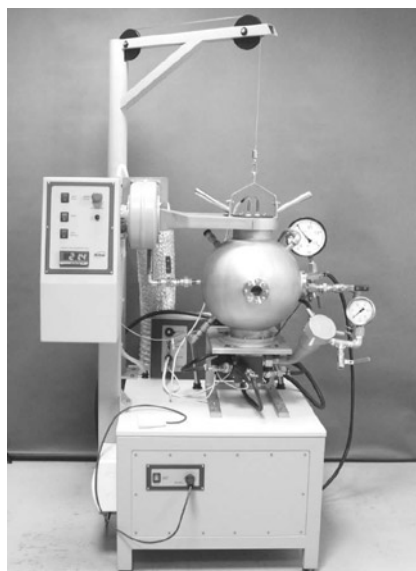
Fig. 6. Experimental stand for testing minimum ignition temperature of dust layers according to PN-EN 50281-2-1 at CNBOP-PIB.

Minimalna temperatura zapłonu pyłów palnych zmniejsza się wraz ze zmniejszeniem rozmiaru cząstek pyłu oraz wraz ze zwiększeniem zawartości części lotnych oraz stężenia tlenu, jak również ulega zwiększeniu wraz ze wzrostem zawartości wilgoci. Minimalna energia zapłonu mieszanin pyłowo-powietrznych mierzona jest w pionowej rurze Hartmanna [9]. Podczas tego badania pył jest rozpraszany przez wtrysk sprężonego powietrza, a źródłem zapłonu jest iskra elektryczna. Następnie obserwuje się zapłon mieszaniny pyłowo-powietrznej oraz

rozprzestrzenianie się płomienia przy zadanej wartości energii wyładowania iskry.

Minimalna energia zapłonu mieszanin pyłowo-powietrznych zmniejsza się wraz ze spadkiem rozmiaru cząstek pyłu oraz wraz ze zwiększeniem zawartości części lotnych i stężenia tlenu, jak również ulega zwiększeniu wraz ze wzrostem zawartości wilgoci.

Parametry takie jak granice wybuchowości (DGW i GGW), maksymalny przyrost ciśnienia wybuchu (P_{max}), maksymalna szybkość przyrostu ciśnienia wybuchu (dp/dt) $_{max}$ oraz graniczne stężenie tlenu (GST), mierzone są przy wykorzystaniu stanowiska badawczego wyposażonego w komorę testową o pojemności 1 m³, lub alternatywnie w mniejszej skali, przy wykorzystaniu sferycznego zbiornika o pojemności 20 dm³ [10]. Na rysunku 7. przedstawiono stanowisko badawcze do pomiarów wyżej wspomnianych parametrów wybuchowości mieszanin pyłowo-powietrznych, stosowane w CNBOP-PIB.



Ryc. 7. Stanowisko badawcze do pomiarów parametrów wybuchowości mieszanin pyłowo-powietrznych (P_{max} , DGW, GGW, GST, dp/dt_{max}) wg serii norm PN-EN 14034 w CNBOP-PIB.

Fig. 7. Experimental stand for testing dust explosion parameters (P_{max} , DGW, GGW, GST, dp/dt_{max}) according to PN-EN 14034 at CNBOP-PIB.

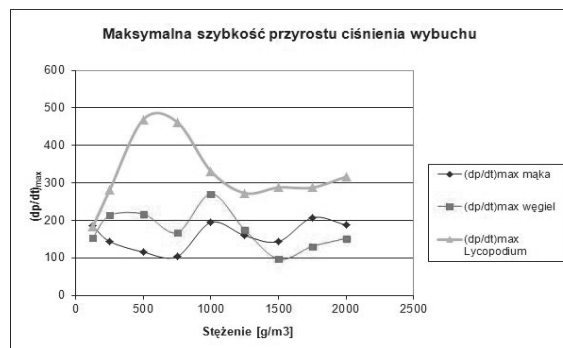
W badaniu tym pył jest wprowadzany do sferycznego zbiornika z podajnika pyłu. Źródło zapłonu ulokowane jest w centrum urządzenia i jest to zazwyczaj 2 zapalniki chemiczne, zazwyczaj każdy o energii zapłonu 5 kJ. Pomiedzy wprowadzeniem pyłu, a zapłonem stosuje się standardowe opóźnienie wynoszące 60 ms. Badanie to wykorzystywane jest zarówno do określeń jakościowych, jak i ilościowych. Wynikiem takiego badania jest standardowy wykres przyrostu ciśnienia w czasie, z zaznaczeniem wartości maksymalnego ciśnienia wybuchu oraz szybkości przyrostu w czasie. Analiza przeprowadzonych wyników na tym stanowisku badawczym jest bardzo podobna do analizy przeprowadzanej przy wybuchach gazów w stałej objętości.

Na Rysunkach 8 i 9 przedstawiono zbiorcze zestawienie zależności maksymalnego ciśnienia wybuchu (P_{max}) oraz maksymalnej szybkości przyrostu ciśnienia wybuchu (dp/dt) $_{max}$ od gęstości pyłu. Badania wykonano dla trzech rodzajów pyłów, tj. mąki ziemniaczanej, węgla aktywnego oraz likopodium.



Ryc. 8. Zależność maksymalnego ciśnienia wybuchu od stężenia pyłu dla 3 wybranych mieszanin pyłowo-powietrznych, uzyskane podczas pomiarów na stanowisku badawczym wg PN-EN 14034 w CNBOP-PIB.

Fig. 8. Maximum explosion pressure vs. dust concentration for 3 selected dust-air mixtures measured according to PN-EN 14034 at CNBOP-PIB.



Ryc. 9. Zależność maksymalnej szybkości przyrostu ciśnienia wybuchu od stężenia pyłu dla 3 wybranych mieszanin pyłowo-powietrznych, uzyskane podczas pomiarów na stanowisku badawczym wg PN-EN 14034 w CNBOP-PIB.

Fig. 9. Maximum rate explosion pressure rise vs. dust concentration for 3 selected dust-air mixtures measured according to PN-EN 14034 at CNBOP-PIB.

Zależność maksymalnej szybkości przyrostu ciśnienia wybuchu od pojemności zbiornika testowego została zapisana w postaci wzoru:

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{max} V^{1/3} = K_{st}$$

gdzie:

K_{st} – stała wybuchowości pyłów (współczynnik K_{st})

p – ciśnienie całkowite

t – czas

V – objętość zbiornika

Współczynnik K_{st} stanowi podstawę klasyfikacji wybuchowości pyłów oraz jest miarą maksymalnej szybkości przyrostu ciśnienia. Współczynnik K_{st} jest odzwierciedleniem współczynnika K_G dla gazów. Zasadniczo, wyróżnia się 4 klasy wybuchowości pyłów, począwszy od St. 0 (pył niewybuchowy) do St. 3 (pył bardzo silnie wybuchowy), co przedstawiono w szczegółach w Tabeli 2.

Tabela 2.

Klasyfikacja wybuchowości pyłów według współczynnika K_{st} [11].

Table 2.

Dust explosibility classification according to K_{st} value [11].

Klasa wybuchowości	K_{st} (bar m/s)	Nazwa
St. 0	0	niewybuchowy
St. 1	1- 200	słabo wybuchowy
St. 2	201 - 300	silnie wybuchowy
St. 3	> 300	bardzo silnie wybuchowy

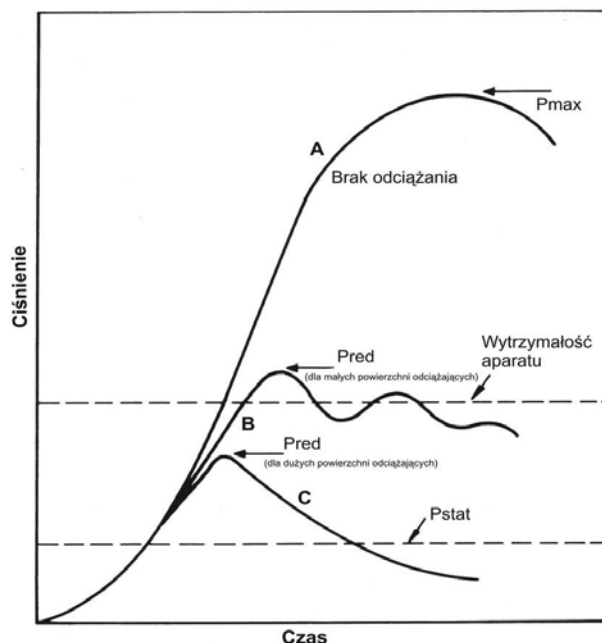
Pozostałym parametrem w zakresie wybuchowości pyłów palnych jest szybkość spalania. Niestety do tej pory nie opracowano jeszcze standardowej metody badawczej, która umożliwiłaby dokonywanie pomiarów tego parametru. Wiedza na temat tego parametru pozwoliłaby na opracowanie potrzebnych w praktyce modeli numerycznych, które zostały rozwinięte w zakresie wybuchów gazów.

Metody zapobiegania wybuchom pyłów

Odciążanie wybuchów

Słabe konstrukcyjnie miejsca w ściankach aparatów i urządzeń procesowych, czy w konstrukcji budynków powinny być tak zaprojektowane, aby otworzyły się we wczesnym stadium rozwoju zjawiska wybuchu. W wyniku czego materiał palny oraz produkty spalania zostają uwolnione do otoczenia, a nadejście powstające wewnątrz aparatu zostaje zredukowane do odpowiedniego poziomu. Wartość tego ciśnienia nazywana jest zredukowanym ciśnieniem wybuchu P_{red} . Rysunek 10 przedstawia standardowy wykres zależności przyrostu ciśnienia w czasie dla zjawiska wybuchu w zamkniętej przestrzeni. Krzywa A przedstawia przyrost ciśnienia dla typowego wybuchu w zbiorniku, gdzie ciśnienie wzrasta do wartości rzędu 15-20 bar, zazwyczaj wartości ciśnienia większej niż standardowe urządzenia i aparaty procesowe są w stanie wytrzymać [12]. Podczas odciążania przyrost ciśnienia zostaje ograniczony do wartości zredukowanego ciśnienia wybuchu P_{red} (krzywa C). Wartość tego ciśnienia zależy przede wszystkim od rozmiarów i miejsca lokalizacji otworów odciążających, jak również od wartości ciśnienia otwierającego urządzenie odciążające. Odpowiednie zaprojektowanie powierzchni odciążającej powinno zapewniać zredukowanie ciśnienia wybuchu do wartości poniżej wytrzymałości konstrukcyjnej chronionego urzą-

żenia. Na etapie projektowania, podczas szacowania wytrzymałości aparatu należy szczególnie wziąć pod uwagę te wszystkie części, które są najbardziej narażone na oddziaływanie ciśnienia wybuchu, np. drzwiczki rewizyjne, czy zawory suwakowe. Dlatego też wytrzymałość najsłabszej części urządzenia procesowego powinna być potraktowana jako wytrzymałość obliczeniowa całego urządzenia. Obliczenia wytrzymałościowe konstrukcji aparatów procesowych szczególnie, gdy są one stare i dawno nie wymieniane (co niestety często zdarza się w przemyśle), nie należą do najłatwiejszych. W tym zakresie pomocny może być poradnik opracowany i wydany przez ICHIME [13]. Metodyka obliczeniowa zawarta w tym poradniku oparta jest o tzw. „metodę elementów skończonych”² stosowaną dla wybranych części urządzenia procesowego.



Ryc. 10. Standardowy wykres zależności ciśnienia w czasie podczas wybuchu przy zastosowaniu systemów odciążania [12].

Fig. 10. Standard profile of explosion pressure vs. time regarding to venting systems [12].

Poprawnie obliczona powierzchnia odciążająca ma decydujący wpływ na wartość ciśnienia P_{red} . W tym zakresie dostępnych jest w światowej literaturze technicznej kilka metod. Do obliczenia powierzchni odciążającej niezbędnych jest kilka podstawowych danych, takich jak:

- Wartość P_{red} , która w żadnym przypadku nie może być przekroczona. Wartość zredukowanego ciśnienia wybuchu zależy od wytrzymałości konstrukcyjnej aparatu procesowego;
- Wartości charakteryzujące wybuchowość pyłów palnych, ze szczególnym uwzględnieniem wartości

² Finite Element Analysis – inżynierska metoda analizy poszczególnych elementów konstrukcji, wykorzystująca głównie technikę CFD (Computational Fluid Dynamics - numeryczną dynamikę płynów), stosowana zazwyczaj do obliczeń wytrzymałościowych.

współczynnika K_{st} oraz maksymalnego ciśnienia wybuchu P_{max} . Obydwe te wartości mierzone za pomocą standardowych metod laboratoryjnych. W Polsce badania takie na zlecenie wykonuje kilka ośrodków badawczych;

- Charakterystyka urządzenia procesowego, szczególnie wartość V i L/D . V jest to objętość urządzenia (otwarta przestrzeń wewnątrz urządzenia). Przykładowo w filtrach zawierających pył palny nie wlicza się do tego objętości worków filtracyjnych. Wartość zależności L/D stanowi stosunek wysokości urządzenia do jego średnicy. W zwartych przestrzeniach na rozprzestrzenianie się płomieni nie ma wpływu przepływ osiowy. Szybkość rozprzestrzeniania się płomieni jest zazwyczaj wolna, a maksymalne ciśnienie wybuchu dla większości pyłów palnych jest ok. 10 razy większe niż ciśnienie początkowe. W układach połączonych przepływ osiowy powoduje, że szybkość rozprzestrzeniania się płomieni jest bardzo wysoka. Wyższe wartości P_{max} mogą zatem powstać, gdy zależność L/D jest stosunkowo duża. Dlatego też wartość L/D odgrywa znaczący wpływ na obliczenia powierzchni odciążających;
- Charakterystyka urządzenia odciążającego. Do obliczenia odpowiedniej powierzchni odciążającej niezbędna jest wartość ciśnienia powodującego uruchomienie urządzenia odciążającego, określona jako P_{stat} . Przy obliczeniach powierzchni odciążających dla aparatów i urządzeń procesowych należy również wziąć pod uwagę maksymalną wartość zakresu tolerancji P_{stat} oraz kilka innych czynników.

Odciążanie skutków wybuchu ogranicza wzrost ciśnienia w aparatach, ale należy pamiętać o tym, że nie chroni przed wybuchem. W tym celu należy zastosować inne systemy ochrony przed wybuchem, jak na przykład system tłumienia. Podczas używania urządzeń odciążających w postaci drzwi eksplozyjnych, które zamykają powierzchnię odciążającą po wybuchu, wówczas procesy chłodzenia gorących produktów spalania mogą spowodować próżnię wewnątrz chronionego urządzenia, co w konsekwencji może doprowadzić do jego deformacji [14]. Ważną również kwestią jest sposób otwierania się drzwi eksplozyjnych oraz ich położenie, co zasadniczo wpływa na efektywność procesu odciążania (EF). Podczas dyspersji pyłów w chronionym urządzeniu procesowym lokalizacja drzwi eksplozyjnych, a także sposób ich otwierania może skutkować zwiększeniem wartości maksymalnego ciśnienia wybuchu. Skuteczność odciążania oraz efektywność powierzchni odciążającej dla drzwi eksplozyjnych jest mniejsza niż w przypadku paneli rozrywających o tej samej powierzchni odciążania.

Podczas odciążania wybuchów mieszanin pyłowo-powietrznych powierzchnie odciążające, wyrzucające na zewnątrz chronionego aparatu jego zawartość oraz produkty spalania, powinny być skierowane w bezpiecz-

ne miejsce, aby ograniczyć straty wśród personelu oraz szkody materialne. Jeśli ze względów technologicznych nie ma możliwości lokalizacji urządzeń chronionych przez systemy odciążania wybuchu wewnątrz budynku, wówczas należy zastosować tzw. kanały odprowadzające, które umożliwią transport produktów spalania oraz fali wybuchu na zewnątrz [15]. Jeśli chronione urządzenie mieści się wewnątrz budynku, należy zatem zlokalizować je jak najbliżej zewnętrznych ścian, tak aby kanał odprowadzający był jak najkrótszy [15]. Kanały odprowadzające wpływają znacząco na zwiększanie wartości ciśnienia podczas procesu odciążania wybuchu. Kanały odprowadzające muszą mieć co najmniej taką samą średnicę/przekrój co powierzchnia odciążania, a także muszą być odporne na wzrost tej samej wartości ciśnienia, co chronione urządzenie procesowe.

Według standardu PN-EN 14491 dotyczącego systemów ochronnych odciążających wybuchy pyłów, wymiarowanie powierzchni odciążających zależy od charakterystyki wybuchowej pyłu, warunków dyspersji pyłu (stężenie, turbulencje) oraz geometrii chronionego urządzenia procesowego. W celu poprawnego określenia powierzchni odciążającej standard PN-EN 14491 wymaga znajomości objętości chronionego urządzenia oraz wartości stosunku długości aparatu do jego średnicy: L/D . Ponadto, podobnie jak w standardzie VDI 3673-1 wymagana tu jest znajomość zredukowanego ciśnienia wybuchu (P_{red}) charakterystycznego dla każdego urządzenia procesowego. Dla różnych zakresów wartości P_{red} powierzchnię odciążającą (A_V) według ww. PN-EN 14491 oblicza się ze wzorów:

Dla P_{red} w zakresie od **0,1 do 1,5 bar**:

$$A_V = B \cdot \left(1 + C \cdot \log \frac{L}{D}\right) \quad [m^2]$$

gdzie:

$$B = [3,264 \times 10^{-5} \times P_{max} \times K_{st} \times P_{red}^{-0,569} + 0,27 \times (P_{stat} - 0,1) \times P_{red}^{-0,5}] \times V^{0,753}$$

$$C = (-4,305 \times \log P_{red} + 0,758)$$

Dla P_{red} w zakresie od **1,5 do 2,0 bar**:

$$A_V = B \quad [m^2]$$

W przypadku odciążania pomieszczeń i budynków norma PN-EN 14491 zaleca stosowanie wartości P_{red} co najmniej o 0,02 bar większej niż P_{stat} . Przy obliczaniu powierzchni odciążających dla budynków należy również pamiętać o ich symetrycznym rozmieszczeniu na ścianach zewnętrznych oraz na konstrukcji dachu. Przebieg zjawiska wybuchu w pomieszczeniu lub budynku zależy od kilku zasadniczych parametrów, do których należy zaliczyć:

- geometrię pomieszczenia lub budynku;
- obecność wyposażenia i elementów konstrukcyjnych;

- możliwość przenoszenia się wybuchu z pomieszczenia do pomieszczenia;
- zaleganie pyłu palnego na elementach wyposażenia.

Biorąc pod uwagę powyższe stwierdzenia norma PN-EN 14491 zaleca obliczanie powierzchni odciążających (AV) dla pomieszczeń oraz budynków przy wykorzystaniu następującego równania:

$$A_V = C \cdot A_S \cdot P_{red}^{-0,5} \quad [m^2]$$

gdzie:

C to stała równania obciążenia w zależności od współczynnika K_{st} :

K_{st} od 0 do 100, $C = 0,018^{0,5}$ bar

K_{st} od 100 do 200, $C = 0,026^{0,5}$ bar

K_{st} od 200 do 300, $C = 0,030^{0,5}$ bar

A_S to wewnętrzna powierzchnia pomieszczenia lub budynku [m^2].

Wartość A_S obejmuje dach lub sufit, podłogę, ściany oraz powierzchnie odciążające. Powierzchnie jakichkolwiek pomieszczeń towarzyszących należy również wliczyć do całkowitej wartości A_S . W obliczeniach tych pomija się powierzchnie wyposażenia pomieszczenia lub budynku oraz powierzchnie zajmowane przez wewnętrzne elementy konstrukcji.

Należy szczególnie pamiętać o tym, że efektywne zastosowanie systemów odciążania skutków wybuchu nie polega tylko i wyłącznie na zaprojektowaniu i obliczeniu odpowiednich powierzchni. Najistotniejszą kwestią jest opanowanie skutków wybuchu, które mogą stwarzać ogromne zagrożenie dla życia i zdrowia ludzi oraz środowiska. W tym przypadku do tych zagrożeń należą:

- płomień i toksyczne produkty spalania;
- fala ciśnienia;
- pył i produkty emisji.

W praktyce inżynierskiej przyjmuje się, że poszczególne elementy składowe instalacji przemysłowych (pomieszczenia), w których występują substancje palne w różnych stanach skupienia (gazy, ciecze, pyły) powinny być od siebie odpowiednio wydzielone, tak aby ewentualne skutki wybuchu nie mogły się rozprzestrzeniać. Jak już wcześniej stwierdzono urządzenia procesowe, w których zainstalowano systemy odciążania skutków wybuchu należy sytuować w takich miejscach, w których po zadziałaniu urządzeń odciążających skutki wybuchu zostaną odprowadzone w bezpieczne miejsce, zazwyczaj na zewnątrz pomieszczeń. W żadnym przypadku nie można kierować powierzchni odciążających na zewnątrz budynków w miejsca, gdzie mogą przebywać ludzie (np. na wewnątrz zakładowe drogi komunikacji, itp.). Chmura pyłu oraz płomień powstałe po wybuchu mieszanin pyłowo-powietrznych, odprowadzone za pomocą urządzenia odciążającego mogą mieć bardzo duży zasięg. Dlatego też projektując takie zabezpieczenia nie można lekceważyć

tych kwestii. W światowej literaturze technicznej dostępnych jest szereg metodologii dotyczących obliczania tzw. „bezpiecznych odległości”, dla urządzeń procesowych narażonych na zjawisko wybuchu, również w przypadku pyłów palnych [16]. Oprócz płomienia podczas odciążania wybuchu do atmosfery wydostaje się również niespalony pył z aparatu, który utworzyć może z powietrzem mieszaninę pyłowo-powietrzną. W momencie, gdy mieszanina ta zostanie zapalona przez strumień ciepła z wydostającego się płomienia może dojść do wybuchu i utworzenia się zjawiska Fireball [17] o określonych skutkach promieniowania cieplnego. Strumień ciepła generowany przez Fireball oraz jego odległość również należy wziąć pod uwagę przy projektowaniu systemów odciążania.

Podstawowym urządzeniem stosowanym w nowoczesnych systemach ochrony przed wybuchem są tzw. płytki lub membrany bezpieczeństwa³, klapy oraz drzwi odciążające. Zasada działania tych urządzeń przedstawia się następująco:

- rozerwanie membrany po przekroczeniu zadanej wartości ciśnienia poniżej wytrzymałości chronionego aparatu;
- szybkie odpowietrzenie wybuchu w bezpieczne miejsce (zazwyczaj do atmosfery).

Oczywiście urządzenia odciążające w postaci płytek lub membran bezpieczeństwa mają również pewne ograniczenia. Należą do nich:

- konieczność odprowadzania skutków wybuchu na zewnątrz pomieszczeń;
- zakaz stosowania dla substancji toksycznych;
- możliwość pojawienia się w aparacie podciśnienia (zagrożenie implozją);
- niezbędne jest określenie stref ochronnych (bezpiecznych odległości), a co się z tym wiąże szczególnych wymagań dotyczących przebywania i dostępu ludzi do zagrożonego obszaru.

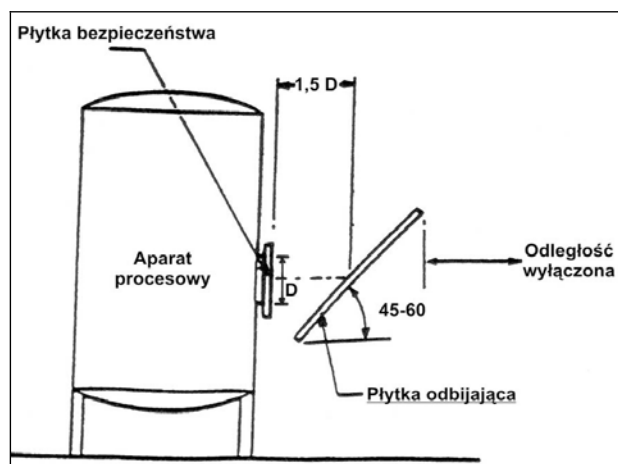
Istnieje również możliwość ograniczenia zasięgu wspomnianych wyżej stref ochronnych, przy zastosowaniu tzw. płytek odbijających (Patrz Rysunek 11). Zasada działania tego urządzenia polega na skierowaniu fali ciśnienia i płomienia do góry (pionowo), zmniejszając tym samym zasięg w poziomie. Na podstawie serii badań poligonowych przeprowadzonych przez angielską organizację Health and Safety Executive⁴ opracowano wytyczne w zakresie stosowania tych zabezpieczeń.

Powierzchnia płytki odbijającej powinna być co najmniej 3 razy większa niż powierzchnia otworu odciążającego. Płytkę tą należy zainstalować pod kątem przy najmniej 45° (w praktyce zazwyczaj stosuje się 60°) w celu jak najbardziej efektywnego odbicia skutków wybuchu. Ponadto płytka odbijająca powinna być zainstalowana w odpowiedniej odległości od powierzchni odciążającej

³ z ang. bursting discs.

⁴ Health and Safety Executive, www.hse.gov.uk

– przeważnie powinno się przyjmować odległość równą $1,5 \times D$, gdzie D to średnica otworu odciążającego.



Ryc. 11. Schemat zastosowania płytki odbijającej [12].

Fig. 11. Application of venting deflector [12].

Pierwszy patent systemu tłumienia wybuchu pochodzi z 1912 r. i przypisuje się go pewnej niemieckiej firmie. Określano go jako „szybki suchy proszkowy środek gaszący”. II wojna światowa przyspieszyła rozwój tej metody walki z wybuchami. Brytyjskie siły powietrzne odkryły, że 80% całkowitych strat samolotów bojowych powstało z powodu pożarów. W oparciu o ten dowód, wymagania wojskowe określiły lekki system o wysokiej skuteczności gaszenia do ochrony silników samolotów i ich systemów paliwowych.

Podobna sytuacja powstała w Niemczech. W rezultacie, szybko rozwijająca się technologia spowodowała, że systemy tłumienia wybuchu oparte były na trzech głównych zasadach:

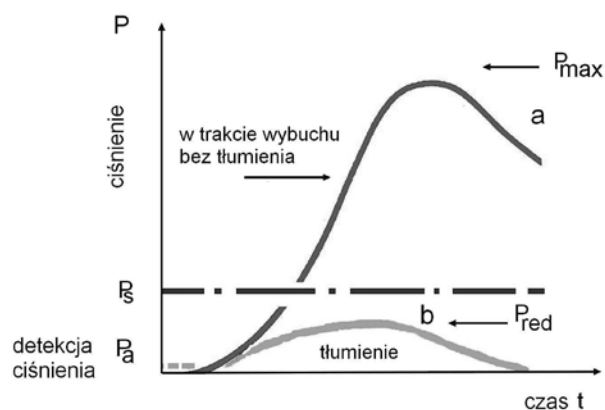
- środek gaśniczy znajduje się trwale pod ciśnieniem w butli;
- w instalacji chronionej musi być zapewniona duża średnica otworu wlotowego;
- zastosowanie tzw. zaworu natychmiastowej reakcji w celu gwałtownego uwolnienia środka tłumiącego za pomocą ładunku pirotechnicznego.

Zasady te, w połączeniu z systemem detekcji płomienia lub wzrostu ciśnienia tworzą podstawę współczesnych automatycznych systemów tłumienia wybuchu stosowanych w urządzeniach i aparatach procesowych stosowanych w przemyśle.

Tłumienie wybuchu polega, zatem na wykryciu zjawiska w początkowym stadium jego rozwoju, zaraz po zapłonie, a następnie na natychmiastowym wyładowaniu środka tłumiącego z taką szybkością, aby ugasić płomień zanim zdąży powstać duży przyrost ciśnienia. Przy dzisiejszej technologii szybkość wyładowania środka tłumiącego do chronionego urządzenia procesowego wynosi około 75 – 300 ms [12]. Rozwiązanie to zapobiega zarówno powstawaniu wysokich ciśnień w wyniku wybuchu, jak również chroni przed przedostaniem się płomieni

do zbiorników i urządzeń procesowych stanowiących zamknięte układy technologiczne. Warunkiem podstawowym jest zaprojektowanie urządzeń procesowych w taki sposób, aby były one odporne na maksymalne założone ciśnienie wybuchu, charakterystyczne dla danej substancji palnej. Podstawowe dane niezbędne do właściwego zaprojektowania systemu tłumienia wybuchu przedstawiono za pomocą standardowej krzywej wzrostu ciśnienia wybuchu w zależności od czasu (Rysunek 12). Za pomocą tego wykresu określa się wymagany czas reakcji czujnika ciśnienia oraz czas wyładowania butli ze środkiem tłumiącym w celu jak najszybszej minimalizacji wzrostu ciśnienia do założonej wartości. Na Rysunku 12 P_{max} oznacza maksymalne ciśnienie wybuchu, P_{red} najwyższą wartość nadciśnienia, która wystąpić może po zadziałaniu systemu tłumienia wybuchu, a P_a to ciśnienie powodujące aktywację systemu tłumienia. Wartość ciśnienia P_a musi być mniejsza niż zaprojektowana wytrzymałość konstrukcji chronionego urządzenia procesowego.

W przypadku zastosowania systemu tłumienia na urządzeniach i aparatach procesowych maksymalne ciśnienie mogące powstać podczas zjawiska wybuchu zostaje ograniczone do wartości zredukowanego ciśnienia P_{red} , a tym samym nie pozwala na rozerwanie konstrukcji tych urządzeń. W praktyce przyjmuje się, że założona wartość zredukowanego ciśnienia wybuchu P_{red} wynosi zazwyczaj około 0,1 MPa [11].



Ryc. 12. Krzywa przedstawiająca wzrost ciśnienia wybuchu dla sytuacji: a) bez tłumienia wybuchu b) z systemem tłumienia wybuchu.

Fig. 12. Dust explosion pressure profile, including: a) no explosion suppression, b) explosion suppression.

Systemy tłumienia wybuch stosowane są zazwyczaj wtedy, gdy nie możliwa jest ochrona urządzeń i aparatów procesowych za pomocą wzmocnienia ich konstrukcji na maksymalne ciśnienie wybuchu P_{max} lub odpowietrzania skutków wybuchu np. przy zastosowaniu płytek bezpieczeństwa lub kłap eksplozyjnych samozamykających. Zastosowanie tłumienia wybuchu jest szczególnie istotne w przypadkach, gdy uszkodzenie konstrukcji urządzeń (utrata założonej wytrzymałości) może doprowadzić do emisji substancji toksycznych szkodliwych dla ludzi lub otoczenia. Czasami tłumienie wybuchu używane jest

w połączeniu z systemami odpowietrzania skutków wybuchu do ochrony niektórych linii produkcyjnych. Zastosowanie tego rodzaju połączeń zabezpieczeń dotyczy głównie sytuacji, w których nie możliwe jest zapewnienie wystarczającej powierzchni dekompresyjnej lub, gdy skutki wybuchu nie mogą być odprowadzane na zewnątrz pomieszczenia, z powodów konstrukcyjnych. Nowoczesne systemy automatycznego tłumienia składają się następujących elementów [12]:

- czujniki ciśnienia i/lub płomienia;
- butle ze środkiem tłumiącym;
- centrala sterująca;
- przetworniki sygnałów z czujników do centrali.

Do zadziałania systemu tłumienia wybuchu niezbędne są detektory, służące albo do wykrycia powstałego nadciśnienia albo płomienia powstałego w wyniku początkowej fazy wybuchu. Czujniki ciśnienia powinny być instalowane na zamkniętych aparatach i urządzeniach procesowych. Czujniki progowe generują sygnał elektryczny, gdy zostanie przekroczona ustalona wartość ciśnienia. Wówczas sensory dynamiczne wysyłają sygnał elektryczny do centrali sterującej. Zwykle stosuje się zarówno czujniki wartości progowych ciśnienia, jak i szybkości przyrostu ciśnienia, co pozwala na odpowiednie dostosowanie do warunków technologicznych charakterystycznych dla danej linii produkcyjnej.

Podsumowanie

Badanie charakterystyk wybuchowości pyłów palnych stanowi zespół precyzyjnie określonych metod pomiarowych, do których zaprojektowane i skonstruowane powinny być odpowiednie stanowiska badawcze. Zarówno zakres metod pomiarowych, jak również technologia wykonania przedmiotowych stanowisk badawczych ulegała i nadal ulega ciągłym udoskonaleniom, aby parametry wybuchowości pyłów palnych określane były w sposób najbardziej adekwatny do rzeczywistego zagrożenia w warunkach przemysłowych. Zespół Laboratoriów Procesów Spalania i Wybuchowości CNBOP-PIB posiadając wykwalifikowany personel badawczy prowadzi określanie charakterystyk wybuchowości pyłów palnych w oparciu o opisane w tym artykule metody i stanowiska badawcze. Uzyskane w badaniach doświadczalnych wyniki pomiarowe w zakresie parametrów wybuchowości mieszanin pyłowo-powietrznych stanowią fundamentalny aspekt wiedzy technicznej, niezbędnej do projektowania i doboru właściwych systemów zabezpieczeń przed wybuchem, w tym przede wszystkim systemów odciążania wybuchów, czy też systemów tłumienia wybuchów.

Literatura

1. Bartknecht W., *Explosions – Course, Prevention, Protection*, Springer-Verlag, 1981;
2. Eckhoff R.K., *Dust explosions in the process industries*, Elsevier, 2003;

3. Summary report on explosion of grain silo in Blaye, INERIS, 1998;
4. Investigation report on dust explosion in West Pharmaceutical Services in Kinston, U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board, 2004;
5. Teodorczyk A., *Podstawy modelowania matematycznego wybuchu mieszaniny pyłowo-gazowej*, III Międzynarodowa Szkoła Wybuchowości Pyłów Przemysłowych, 1987;
6. Lebecki K., *Zagrożenia pyłowe w górnictwie*, GIG, 2004;
7. Eckhoff R.K., *Differences and similarities of dust and gas explosions: A critical evaluation of the European ATEX directives in relation to dust*, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 19, 2006;
8. PN-EN 50281-2-1, Urządzenia elektryczne do stosowania w obecności pyłów palnych. Część 2-1: Metody oznaczania minimalnej temperatury zapłonu pyłów, PKN, 2002;
9. PN-EN 13821, Przestrzenie zagrożone wybuchem. Zapobieganie wybuchowi i ochrona przed wybuchem. Oznaczanie minimalnej energii zapłonu mieszanin pyłowo-powietrznych, PKN, 2004;
10. PN-EN 14034, Części od 1 do 4. Oznaczanie charakterystyk wybuchowości obłoków pyłu, 2011;
11. Mannan S., *Lees' Loss Prevention in the Process Industries*, Elsevier, 2005;
12. Barton J., *Dust Explosion – Protection and Prevention: A practical guide*, ICHME, 2002;
13. Pilkington S., *Process vessels subject to explosion risk: design guidelines for the pressure rating of weak vessels subject to explosion risk*, ICHME, 2000;
14. Siwek R., *Explosion venting technology*, Journal of Loss Prevention in the Process Industries 9/1996;
15. Tamanini F., Valiulis J.V., *Improved guidelines for the sizing of vents in dust explosions*, Journal of Loss Prevention in the Process Industries 9/1996;
16. Wingerden K., *Prediction of pressure and flame effects in the direct surroundings of installations protected by dust explosion venting*, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 6/1993;
17. Holbrow P., Hawksworth S.J., Tyldesley A., *Thermal radiation from vented dust explosions*, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 13/2000;
18. Hattwig M., *Handbook of explosion protection and prevention*, Elsevier, 2006;

mgr inż. Rafał Porowski

w 2002r. ukończył studia w Szkole Głównej Służby Pożarnej w Warszawie. W roku 2010 ukończył studia doktorskie na Wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej. Temat rozprawy doktorskiej dotyczy badań doświadczalnych i symulacji numerycznych przejścia do detonacji w mieszaninach gazowych. Pełni

funkcję kierownika Zespołu Laboratoriów Procesów Spalania i Wybuchowości w Centrum Naukowo-Badawczym Ochrony Przeciwpożarowej PIB w Józefowie.

mł. bryg. mgr inż. Daniel Małozieć

w 1999r. ukończył studia w Szkole Głównej Służby Pożarniczej w Warszawie. Obecnie pełni funkcję zastępcy

kierownika Zespołu Laboratoriów Procesów Spalania i Wybuchowości w Centrum Naukowo-Badawczym Ochrony Przeciwpożarowej Państwowym Instytucie Badawczym w Józefowie. Specjalność – badania w zakresie reakcji na ogień wyrobów budowlanych. Oficer PSP.