

bryg. dr hab. Marzena Pólka, prof. nadzw.*
st. kpt. dr inż. Bożena Kukfisz*

Analiza zagrożeń pożarowo-wybuchowych spowodowanych pyłami palnymi w budynkach przemysłowych

*Fire-explosive hazard analysis caused by combustible dusts
in industrial buildings*

Streszczenie. W artykule opisano wymagania dotyczące ochrony przeciwpożarowej elementów konstrukcyjnych i urządzeń stosowanych w przestrzeni, w której mogą gromadzić się pyły palne. Przedstawiono wyniki badania minimalnej temperatury zapłonu warstwy pyłu (MITL), minimalnej temperatury zapłonu obłoku kurzu (MTCD), maksymalnej dopuszczalnej temperatury powierzchni maszyn (MAST) pracujących w obecności wybranych pyłów palnych i samozapłonu temperatury czterech typów pyłów: węglowego z kopalni doświadczalnej „Barbara”, drzewnego, siodłu jęczmiennego i pyłu mąki Szymanowskiej.

Słowa kluczowe: budynki przemysłowe, wybuchy, pyły palne.

Abstract. The article described requirements which determined for protection against fire and explosion of building structural elements and of appliances used in space where dust accumulates. The article presented results of the minimal ignition temperature of dust layer (MITL), minimal ignition temperature of dust cloud (MTCD), values of the maximum acceptable surface temperature (MAST) of machines operating in the presence of selected combustible dust and spontaneous combustion temperatures for four type of combustible dusts: the “Barbara” coal dust, wood dust, barley malt dust and the Szymanowska flour dust.

Keywords: industrial buildings, explosion, combustible dusts.

Z punktu widzenia zapewnienia bezpieczeństwa pożarowego istotne jest zapobieganie powstawaniu wybuchów spowodowanych przez pyły palne, gdyż zniszczenia mogą osiągać znaczne rozmiary. Wybuchy pyłów palnych materiałów sypkich mogą nastąpić na każdym etapie produkcji w przemyśle spożywczym, drzewnym, farmaceutycznym, górnictwie [1 ÷ 3], zarówno podczas transportu, przetwarzania, magazynowania oraz składowania, szczególnie w przypadkach, gdy niespełnione są podstawowe wymagania z zakresu bezpieczeństwa pożarowego. Częstymi konsekwencjami pożarów są nie tylko uszkodzenia urządzeń i maszyn, ale także katastrofy konstrukcji budynków, w których wystąpił zapłon, oraz uszkodzenia obiektów sąsiadujących [4 ÷ 6]. Ochrona przed wybuchem realizowana jest przez unikanie gromadzenia pyłów w miejscach niedozwolonych dzięki stałym kontrolom, utrzymanie pomieszczeń w czystości, likwidowanie nieszczelności urządzeń, eliminowanie źródeł mogących spowodować zapłon materiału, spełnienie przepisów ochrony przeciwpożarowej, niedopuszczanie do tworzenia atmosfer wybuchowych

w maszynach, np. przez prowadzenie procesów technologicznych w obecności gazu obojętnego. Uniknięcie atmosfery wybuchowej na poszczególnych etapach produkcji nie zawsze jest możliwe i dlatego należy stosować niezbędne środki chroniące przed pożarem oraz nadmiernym wzrostem ciśnienia i powstającymi odłamkami. Osiąga się to przez zapewnienie odpowiednich warunków technicznych w pomieszczeniach lub urządzeniach, w których występują pyły, np. lekkich konstrukcji budowlanych, stosowanie otworów wentylacyjnych (odciążających) pozwalających na odprowadzanie fali nadciśnienia na zewnątrz budynku w otwartej przestrzeni oraz zabezpieczenie przed jej przedostaniem do sąsiednich pomieszczeń. Istotne jest też zabezpieczenie instalacji procesowych przed powstaniem pożaru, przez ograniczenie prawdopodobieństwa wystąpienia w danym momencie wszystkich niezbędnych czynników opisanych czworościanem spalania.

Wymagania ochrony przeciwpożarowej i wybuchowej odnoszą się do elementów konstrukcyjnych budynków, w których może być obecny pył palny, oraz urządzeń w nich stosowanych. Palny pył na ogrzanej powierzchni, pobierając z niej ciepło, stwarza zagrożenie pożarowe. W profilaktyce wybuchowej niezbędna jest znajomość wła-

ściwości palnych pyłu decydujących o zagrożeniu pożarowo-wybuchowym na skutek jego zetknięcia z nagrzaną powierzchnią. Jest to minimalna temperatura zapłonu obłoku pyłu oraz warstwy pyłu wyznaczona na podstawie PN-EN 50281-2-1:2002. **Minimalna temperatura zapłonu obłoku pyłu (MTZO)** to najniższa temperatura gorącej, wewnętrznej ścianki pieca, w której dochodzi do zapłonu obłoku pyłu wewnątrz pieca [7]. **Minimalna temperatura zapłonu warstwy pyłu (MTZW)** to najniższa temperatura gorącej powierzchni, w której dochodzi do zapłonu warstwy pyłu określonej grubości [7], znajdującej się na tej powierzchni. Zapłon może nastąpić również w wyniku niedostatecznego smarowania części ruchomych w łożyskach, przepustach wałów i uszczelnieniach, a także w przypadku dostania się ciał obcych w miejsca przylegających do siebie ruchomych części urządzeń, co może spowodować szybki wzrost temperatury powierzchni.

Istotnym zagadnieniem pod względem zagrożenia pożarowego i wybuchowego jest **zjawisko samonagrzewania nagromadzeń pyłu w objętości**. Proces samozapalenia pyłów węglowego i/lub metanu jest szczególnie groźny w kopalniach, gdzie może być inicjatorem wybuchu pyłu. Zjawisko samonagrzewania pyłu w warunkach

* Szkoła Główna Służby Pożarniczej, Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego

normalnych może wystąpić w czasie 24 h składowania hałdy węgla [8]. Najczęściej występujące pożary w kopalniach to pożary endogeniczne, których przyczyną jest samozapalenie [9]. Ze względów bezpieczeństwa istotne jest odpowiednie poznanie zjawiska samonagrzewania i samozapalenia. Podatność pyłów palnych na samonagrzewanie wyznacza się przez analizę minimalnej temperatury samozapalenia pyłu w koszykach o określonej znormalizowanej objętości poddanych działaniu wybranej ekspozycji cieplnej. Zjawisko samonagrzewania przebiega ze znacznie większą intensywnością, w przypadku większej temperatury otoczenia oraz pyłu. Nawet niewielki wzrost temperatury rzędu 10 °C może spowodować skrócenie o połowę czasu potrzebnego do samozapalenia. Skłonność do samozapalenia nagromadzeń pyłu wyznacza się wg normy PN-EN 15188:2009 [9]. Warto zwrócić uwagę, że samonagrzewanie pyłu palnego zależy od jego rodzaju, stopnia rozdrobnienia i wilgotności.

W artykule przedstawiono wyniki badań wraz z analizą podatności wybranych pyłów palnych na zapłon i samozapalenie. Oznaczono minimalną temperaturę zapłonu warstwy i obłoku oraz temperaturę samozapalenia pięciu pyłów o wielkości ziarna $\leq 200 \mu\text{m}$: węglowego „Barbara”; skrobi kukurydzianej; słoju jęczmiennego; mąki Szymanowskiej; drzewnego po cyklizowaniu.

Badanie minimalnej temperatury zapłonu warstwy i obłoku pyłu

Obszar klasyfikacji stref zagrożenia wybuchem przedstawiony w normie PN-EN 60079-10-2:2009 nie podaje wpływu warstwy pyłu na zagrożenie wybuchem [9]. Zagrożenie pożarowe i wybuchowe spowodowane przez zalegające warstwy pyłów powinno być rozpatrywane osobno w przypadku warstw i obłoków. Z doświadczeń i praktyki wynika, że wartości MTZO danego pyłu są zazwyczaj dużo większe niż MTZW. Zagrożenia pożarowe i wybuchowe spowodowane przez pyły zależą głównie od jego rodzaju, grubości warstwy i prędkości osadzania pyłów.

Specyficzną właściwością pyłów w przeciwieństwie do gazów i par cieczy jest zależność parametrów zapalności i wybuchowości nie tylko od właściwości pyłu (lotności, zawartości składników palnych itp.), ale również od rozdrobnienia czy wilgotności. Przy wyznaczeniu wartości MTZW powinien być stosowany pył o stopniu rozdrobnienia 200 μm i/lub 500 μm albo o dowolnym

rozdrobnieniu. Stąd też istotnym problemem w procesie produkcyjnym, gdzie pyły występują w różnej postaci, jest wybór materiału do badań (miejsce pobrania próbek). Jako kryterium wyboru stosuje się najbardziej niebezpieczną próbkę, tzn. pył o największym rozdrobnieniu i najmniejszej zawartości wilgoci. W tabeli 1 przedstawiono przykładowe wyniki wartości MTZW i MTZO wybranych pyłów przemysłowych w przypadku warstwy grubości 5 i 12,5 mm.

Tabela 1. Zależność minimalnej temperatury zapłonu warstwy (MTZW) w przypadku warstwy wybranych pyłów przemysłowych grubości 5 i 12,5 mm. Wielkość ziaren pyłów $\leq 200 \mu\text{m}$ [6]

Rodzaj pyłu przemysłowego	Gęstość nasypowa ρ [g/cm ³]	MTZW [°C] w przypadku grubości warstwy pyłu [mm]		MTZO [°C]
		5	12,5	
Pył mąki Szymanowskiej	0,542	420	400	500
Pył słodowy	0,334	290	270	440
Pył drzewny sosnowy po cyklizowaniu	0,255	310	280	360
Pył węglowy „Barbara”	0,379	230	210	590
Pył skrobi kukurydzianej	0,502	>420	>420	430

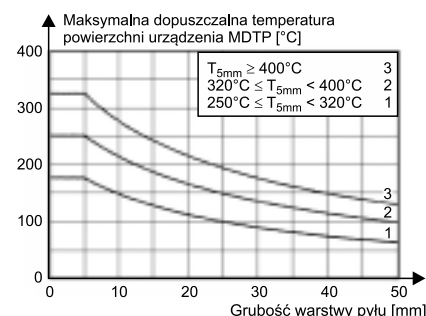
Badanie minimalnej dopuszczalnej temperatury powierzchni urządzeń

Warunki bezpieczeństwa urządzeń określone są w zakresie wartości znamionowych oraz z myślą o prawidłowej instalacji i konserwacji podczas użytkowania. Intensywność i czas trwania uszkodzeń wewnętrznych lub zewnętrznych urządzenia powinny być ograniczone do wartości, które nie spowodują awarii. Maksymalną dopuszczalną temperaturę powierzchni (MDTP) urządzeń stosowanych w strefach zagrożonych wybuchem określa się wg norm PN-EN 50281-1-2:2002, [12], PN-EN 60079-10-2:2009 [11], stosując odpowiedni margines bezpieczeństwa uwzględniający wartości MTZW i MTZO w taki sposób, że MDTP urządzeń stosowanych w strefach zagrożonych wybuchem pyłów palnych nie powinna przekraczać:

- wartości mniejszej o 75K od MTZW w przypadku warstw pyłów grubości do 5 mm [12];
- 2/3 wartości MTZO.

Zgodnie z zasadą nr 1, załącznik B [9] należy przyjąć tę procedurę wyznaczenia MDTP, jeśli grubość zalegającej warstwy pyłu w warunkach przemysłowych jest kon-

troLOWANA, usuwana lub nie, albo w sposób projektowy ograniczana do 5 mm. Jeżeli istnieje możliwość tworzenia się na urządzeniach warstw pyłów grubości 5 ÷ 50 mm, a minimalna temperatura zapłonu warstwy grubości 5 mm jest równa lub przekracza 250 °C, to wartość MDTP należy przyjąć (zasada nr 2 [9]) zgodnie z wykresem przedstawionym na rysunku.



Spadek maksymalnej dopuszczalnej temperatury powierzchni w przypadku warstwy pyłu grubości 0 – 50 mm [5]

W tabeli 2 przedstawiono przykładowe wartości MDTP w przypadku warstw pyłu grubości 5 i 12,5 mm oraz obłoku wybranych pyłów przemysłowych.

Podczas wyznaczania charakterystycznych parametrów materiałów, gdy źródłem zapłonu jest powierzchnia nagrzana, należy zwrócić uwagę na możliwość znacznego obniżenia temperatury zapłonu warstwy i obłoku spowodowanej zanieczyszczeniem innymi substancjami, w tym olejem. Wówczas wyniki mogą odbiegać od zaprezentowanych.

Tabela 2. Wartości maksymalnej dopuszczalnej temperatury dla powierzchni urządzeń elektrycznych (MDTP) pracujących w obecności pyłów zbożowych [5]

Rodzaj pyłu przemysłowego	MDTP [°C]		
	5 mm	12,5 mm	obłok
Pył mąki Szymanowskiej	345	325	334
Pył słodowy	215	195	294
Pył sosnowy po cyklizowaniu	235	205	240
Pył węglowy „Barbara”	155	135	394
Pył skrobi kukurydzianej	> 420 – 75 °C	>420 – 75 °C	287

Badanie skłonności nagromadzenia pyłu do samozapalenia

Przyczyną zapłonu palnych pyłów pochodzenia organicznego (naturalnego), zgromadzonych w ciągu dłuższego czasu (w niskiej temperaturze początkowej materiału i otoczenia) w postaci warstw (stosów) w niedozwolonych miejscach, może być ich samonagrzewanie, któremu często towarzyszy wydzielanie dwutlenku węgla. Monitorowanie jego stężenia jest jedną z metod pozwa-

lających na wykrycie takiego typu źródeł zapłonu. W tabeli 3 przedstawiono wyniki wyznaczonej temperatury samozapalenia wszystkich badanych pyłów. Badania wykonano w warunkach pokojowych, w temperaturze 20 – 22 °C oraz przy ciśnieniu ok. 1000 hPa. Próbkę pyłów nie były suszone.

Tabela 3. Temperatura samozapalenia badanych pyłów wg PN-EN 15188:2009 [6]

Koszyczek	Objętość koszyczka [cm ³]	T _{st} – temperatura samozapalenia [°C]				
		pył mąki Szymanowskiej < 200 μm	pył skrobi kukurydzianej < 200 μm	pył siodu jęczmiennego < 200 μm	pył węglowy „Barbara” < 200 μm	pył drzewny sosnowy po cyklinowaniu < 200 μm
1	23,00	206	karmelizacja pomiędzy 212°C a 228°C	190	128	158
2	54,80	198		182	120	150
3	105,15	192		174	116	146
4	207,39	186		168	108	140

Analiza i wyniki badań

Na podstawie przeprowadzonych badań przelizowano wartości MTZO i MTZW. Spośród wszystkich pyłów badanych metodą A, najbardziej niebezpieczny pożarowo-wybuchowo okazał się pył węglowy, o temperaturze zapłonu 200 ÷ 240 °C. Wpływ na to mogła mieć jego gęstość nasypowa, która plasowała się w dolnej połowie reszty pyłów, a w dużej mierze skład chemiczny. Ponadto maksymalna dopuszczalna temperatura powierzchni urządzeń w przypadku tego pyłu mogła być wyznaczona wyłącznie eksperymentalnie, gdyż wynosiła poniżej 250 °C. Temperatury zapłonu pyłu skrobi kukurydzianej nie udało się wyznaczyć, ponieważ była wyższa niż możliwości grzewcze użytego pieca (> 420 °C) oraz z powodu braku warunków pomiarów zgodnych z normą. Istotnym czynnikiem decydującym o niebezpieczeństwie pożarowym pyłu jest czas potrzebny do osiągnięcia zapłonu. Pył sosnowy (200 μm, 5 mm), który uległ zapłonowi w temperaturze 320 °C, już po 4 min był najbardziej niebezpieczny. Wartość czasu do zapłonu może być wyznaczona z pewnym błędem ze względu na różny stopień wilgoci próbki. Najwyższy czas do zapłonu odnotowano w przypadku pyłu węgla (≤ 200 μm, 5 mm), gdyż w ciągu 3 min jego temperatura wzrosła o ok. 120 °C.

Podczas badania pyłów metodą B okazało się, że temperatura zapłonu obłoków pyłów (oprócz skrobi kukurydzianej) była większa od wielkości temperatury zapłonu warstwy. Jest to wynikiem słabszej przewodności ciepła gazów niż ciał stałych oraz tym, że przekazywanie ciepła w atmosferze pyłowo-powietrznej następuje pomiędzy cząsteczkami, które są znacznie oddalone od siebie.

Za najbardziej podatny na samonagrzewanie należy uznać pył węglowy „Barbara”. W porównaniu z innymi badanymi py-

łami był najbardziej niebezpieczny pod względem pożarowym i wybuchowym. Jego temperatura samozapalenia, w zależności od wielkości koszyczka (grubości warstwy), wynosiła 108 ÷ 128 °C.

Zawartość wilgoci nie wpływa zazwyczaj na wartość temperatury samozapalenia py-

łów, lecz na czas jej osiągnięcia. Najbardziej bezpieczny okazał się pył skrobi kukurydzianej. Nie udało się wyznaczyć dokładnej temperatury samozapalenia, ze względu na proces jej karmelizacji. Można przypuszczać, że wynosi ona 212 ÷ 228 °C. Biorąc pod uwagę jedną objętość pyłu np. 23 cm³, można stwierdzić, porównując wartość temperatury samozapalenia, że pyły mają różną tendencję do samonagrzewania i samozapalenia. Wzrost objętości próbki pyłów powodował zmniejszenie temperatury samozapalenia. Tę zależność zaobserwowano w przypadku wszystkich pyłów. Można to wyjaśnić tym, że kumulacja ciepła w większej objętości jest większa niż w przypadku mniejszej objętości. Stąd też w wyniku znacznej kumulacji ciepła ze wzrostem objętości temperatura samozapalenia próbki się zmniejsza. Podczas badań zwrócono uwagę na różne wartości czasu potrzebnego do ogrzewania próbki do czasu powstania samozapalenia.

Podsumowanie

Wyniki badań przeprowadzonych w Szkole Głównej Służby Pożarniczej dotyczących oznaczenia wartości MTZW, MTZO, MDTP oraz T_{st} pyłów palnych pozwalają sformułować następujące wnioski:

- na obniżenie minimalnej temperatury zapłonu pyłu w warstwie zdecydowanie bardziej wpływa grubość zalegającej warstwy aniżeli wielkość ziaren pyłu;

- im drobniejsze ziarna pyłu, tym większa jego gęstość nasypowa. Powodem tej zależności jest ilość i wielkość wolnych obszarów powstających pomiędzy cząstkami. Ze spadkiem wielkości cząstek pyłu maleje liczba i rozmiar wolnych przestrzeni. Okres nagrzewania warstwy pyłu, poprzedzający moment wystąpienia zapłonu, na ogół ulega wydłużeniu wraz ze wzrostem gęstości nasypowej danego pyłu;

- oznaczanie minimalnej temperatury zapłonu pyłów w warstwie z uwzględnieniem składu ziarnowego pyłu i grubości warstwy istotnie wpływa na prawidłową ocenę oraz dobór urządzeń pracujących w miejscach zapyłonych. Wiąże się to z ograniczeniem zagrożeń, jakie powodują palne pyły przemysłowe;

- wzrost objętości pyłu powoduje wzrost jego podatności do samonagrzewania i samozapalenia, a także ma wpływ na zwiększenie wartości czasu potrzebnego do samozapalenia;

- większa gęstość nasypowa pyłu zazwyczaj powoduje, że poszczególne ziarna mają kontakt ze sobą oraz z gorącą płaszczyzną na większej powierzchni styku, co polepsza transfer i kumulację ciepła w układzie; wzrost zagrożenia pożarowo-wybuchowego może powodować zaleganie warstw pyłu na płaszczyznach powodujących jego utrząsanie i wzrost gęstości pyłu;

- rodzaj pyłu palnego ma istotny wpływ na wartość czasu potrzebnego na samonagrzewanie;

- analiza porównawcza wartości temperatury samozapalenia badanych pyłów pozwala je uszeregować pod względem niebezpieczeństwa pożarowo-wybuchowego wg następujących kolejności: pył węglowy „Barbara” > pył drzewny > pył siodu jęczmiennego > pył mąki Szymanowskiej.

Wyniki uopowszechniono w ramach projektu finansowanego przez NCBiR Nr O ROB 0005 01/2011/01.

Literatura

[1] Sobolewski M., Półka M., Woliński M., Kukfisz B., The use of selected extinguishing powder for reducing industrial dust explosion impact, *Przemysł Chemiczny*, 92,10, 1000 – 1003.

[2] Dyduch Z., *Ochrona przeciwpożarowa* 2007, 2.

[3] Abbot J. A., *Prevention of fires and explosions in Dryers*, Institute of Chemical Engineers, UK, Rugby, 1990.

[4] Eckhoff R. K., *Dust explosions*, Reed Educational and Professional Publishing, USA, 1997.

[5] PN-EN 50281-2-1:2002 Urządzenia elektryczne do stosowania w obecności pyłów palnych. Część 2-1: Metody badania – Metody oznaczania minimalnej temperatury zapłonu pyłu.

[6] Kukfisz B., Półka M., Salamonowicz Z., Woliński M., *Badania inertyzacji mieszanin pyłowo-powietrznych*, *Przemysł Chemiczny* 93, 1, 103 – 109, 2014.

[7] PN-EN 15188:2009 Oznaczanie skłonności nagromadzeń pyłu do samozapalenia.

[8] PN-EN 60079-10-2:2009 Urządzenia elektryczne do stosowania w obecności pyłów palnych – Część 10 – Klasyfikacja obszarów, w których mogą być obecne pyły palne.

[9] PN-EN 50281-1-2: 2002 Urządzenia elektryczne do stosowania w obecności pyłów palnych. Część 1-2: Urządzenia elektryczne chronione przez obudowę – Dobór, instalacja i konserwacja.