

Załącznik nr 3

---

**AUTOREFERAT**  
**PRZEDSTAWIAJĄCY OPIS DOROBKU I OSIĄGNIĘĆ**  
**NAUKOWYCH**

dr Zdzisław Dyduch

Główny Instytut Górnictwa  
Katowice 2017

## SPIS TREŚCI

Imię i Nazwisko.....	3
Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytuł rozprawy doktorskiej.....	3
Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych .....	3
Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. nr 65, poz. 595 ze zm.) .....	4
Tytuł osiągnięcia naukowego.....	4
Zestawienie jednotemetycznych publikacji stanowiących podstawę pracy habilitacyjnej (autor/autorzy, tytuł, rok wydania, nazwa wydawnictwa) .....	4
Omówienie celu naukowego ww prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich wykorzystania .....	5
Wprowadzenie.....	5
Zarys metod oznaczania parametrów zapalności i wybuchowości pyłów przemysłowych .....	6
Zastosowanie wyników badań do pogłębionej interpretacji oznaczeń parametrów zapalności i wybuchowości pyłów przemysłowych.....	10
Szczegółowy opis publikacji stanowiących podstawę osiągnięcia naukowego wraz z komentarzem autora.....	13
Podsumowanie .....	29
Pozostała działalność naukowo-badawcza.....	30
Informacje o dorobku publikacyjnym .....	32
Pozostałe osiągnięcia w pracy naukowo-badawczej.....	34

## IMIĘ I NAZWISKO

Imię i nazwisko: *Zdzisław Dyduch*

Data i miejsce urodzenia: *30.04.1957, Mikołów*

Adres domowy: *os. C. Norwida 3/6, 43-190 Mikołów*

## POSIADANE DYPLOMY, STOPNIE NAUKOWE – Z PODANIEM NAZWY, MIEJSCA I ROKU ICH UZYSKANIA ORAZ TYTUŁ ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Nazwa: *doktor nauk technicznych*

Dyscyplina: *Górnictwo*

Miejsce uzyskania: *Główny Instytut Górnictwa  
pl. Gwarków 1, Katowice*

Rok uzyskania: *1994*

Tytuł rozprawy doktorskiej: *Doświadczalny model przenoszenia wybuchu pyłu węglowego w wyrobiskach górniczych*

Nazwa: *magister*

Miejsce uzyskania: *Uniwersytet Jagielloński  
ul. Reymonta 4, Kraków*

Rok uzyskania: *1981*

Kierunek studiów: *fizyka*

Specjalność: *fizyka wysokich energii*

## INFORMACJA O DOTYCHCZASOWYM ZATRUDNIENIU W JEDNOSTKACH NAUKOWYCH

od 1983 do nadal – *Główny Instytut Górnictwa. Pl. Gwarków 1, 40-160 Katowice*

zajmowane stanowiska:

do 1994 – asystent

od 1994 do 2003 – adiunkt

od 2003 do nadal – główny specjalista badawczo-techniczny

1990 – Christian Michelsem Institute, Fantoft, Bergen

zajmowane stanowiska: stażysta – stypendium naukowe ONZ

1997 – Aerospace Engineering, Michigan University, Ann Arbor

zajmowane stanowiska: stażysta – stypendium naukowe

WSKAZANIE OSIĄGNIĘCIA WYNIKAJĄCEGO Z ART. 16 UST. 2 USTAWY Z DNIA 14 MARCA 2003 R. O STOPNIACH NAUKOWYCH I TYTULE NAUKOWYM ORAZ O STOPNIACH I TYTULE W ZAKRESIE SZTUKI (DZ.U. NR 65, POZ. 595 ZE ZM.)

TYTUŁ OSIĄGNIĘCIA NAUKOWEGO

*Metodologia badania właściwości zapalnych i wybuchowych pyłów węglowych*

ZESTAWIENIE JEDNOTEMETYCZNYCH PUBLIKACJI STANOWIĄCYCH PODSTAWĘ PRACY HABILITACYJNEJ (AUTOR/AUTORZY, TYTUŁ, ROK WYDANIA, NAZWA WYDAWNICTWA)

1. Lebecki K., Dyduch Z., Fibich A., Śliż J.: *Ignition of a dust layer by a constant heat flux*, J. Loss Prev. Proc. Ind., **16**, No. 4, 2003  
IF: 0.602; MNiSW: 25 pkt.;  
udział własny: 70%; *Zaprojektowanie badań i udział w nich, interpretacja i opracowanie wyników doświadczalnych, przygotowanie manuskryptu*
2. Dyduch Z., Majcher B.: *Ignition of a dust layer by a constant heat flux-heat transport in the layer*, J. Loss Prev. Proc. Ind., **19**, No. 2-3, 2006  
IF: 0.419; MNiSW: 25 pkt.;  
udział własny: 80%; *napisanie oprogramowania, wykonanie z jego pomocą obliczeń zmian temperatury w warstwie pyłu, interpretacja i opracowanie wyników oraz przygotowanie manuskryptu*
3. Dyduch Z., Majcher-Morawiec B.: *Oznaczanie prędkości spalania w mieszaninach pyłowo-powietrznych z wykorzystaniem modelu wybuchu w zamkniętej objętości*, Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko, **2**, 2007  
MNiSW: 5 pkt.;  
udział własny: 80%; *napisanie oprogramowania dopasowującego parametry modelu do wyników części doświadczalnej, wykonanie z jego pomocą obliczeń, interpretacja i opracowanie wyników oraz przygotowanie manuskryptu*
4. Dyduch Z.: *Szacowanie laminarnej szybkości spalania mieszanin pył-powietrze na podstawie pomiarów ciśnienia w komorze sferycznej*, Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko, **4**, 2009  
MNiSW: 5 pkt.
5. Dyduch Z., Skjold T.: *An assessment of the laminar burning velocity in dust/air mixtures based on a model for dust explosions in closed 20-litre vessels*, Proceedings of the 8<sup>th</sup> Eighth International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions, Yokohama 5-10 September 2010  
udział własny: 50%; *wykonanie obliczeń wykorzystujących wszystkie dane doświadczalne, interpretacja i opracowanie wyników obliczeń oraz przygotowanie manuskryptu*

6. Dyduch Z., Pękalski A.: *Methods for more accurate determination of explosion severity parameters*, Loss Prev. Proc. Ind., **26**, 2013, 1002-1007  
IF: 1.347; MNiSW: 25 pkt.;  
udział własny: 60%; *sformułowanie metody statystycznej i metody korekcji, przygotowanie oprogramowania wykonującego obliczenia z wykorzystaniem obu metod i wykonanie z jego pomocą obliczeń oraz przygotowanie manuskryptu*
7. Dyduch Z., Toman A., Adamus W.: *Measurements of turbulence intensity in the standard 1 m<sup>3</sup> vessel*, Loss Prev. Proc. Ind., **40**, 2016, 180-187  
IF: 1.818; MNiSW: 25 pkt.;  
udział własny: 80%; *zaprojektowanie części doświadczalnej i obliczeniowej, udział w pomiarach chwilowej prędkości przepływu fazy gazowej, interpretacja i opracowanie wyników pomiarów oraz przygotowanie manuskryptu*

*Udział naukowy współautorów w pracach wymienionych jako osiągnięcie naukowe został przedstawiony w załączonych oświadczeniach znajdujących się w załączniku nr 4 do Wniosku*

## OMÓWIENIE CELU NAUKOWEGO WW PRAC I OSIĄGNIĘTYCH WYNIKÓW WRAZ Z OMÓWIENIEM ICH WYKORZYSTANIA

### WPROWADZENIE

W poprzednim rozdziale wymieniłem 7 prac, których tematykę można określić wspólnym tytułem *Krytyczna analiza metod badania właściwości zapalnych i wybuchowych pyłów przemysłowych*. Uważam, że wyniki zawarte w tych pracach stanowią oryginalne osiągnięcia naukowe. Wspomniane prace zajmują się problemem interpretacji wyników standardowych badań właściwości zapalnych i wybuchowych pyłów przemysłowych, opisują próby zastosowania nowych metod oznaczania ich właściwości wybuchowych i proponują nowe metody opracowywania wyników pomiarów.

Prace [1,2] dotyczą metodologii oznaczania minimalnej temperatury zapłonu warstwy pyłów. Zawierają wyniki doświadczalne [1] i numeryczne [2] uzyskane poprzez zastosowanie zmodyfikowanej procedury oznaczania tego parametru. Zaproponowana modyfikacja miała na celu wierniejsze odtworzenie rzeczywistych warunków panujących w instalacjach przemysłowych niż ma to miejsce podczas standardowego badania. Uzyskane wyniki umożliwiają szersze spojrzenie na zagrożenie związane z zatleniem warstw pyłu osiadłego i ocenę tego zagrożenia na podstawie standardowych wyników badań.

Prace [6,7] dotyczą metody oznaczania podstawowych parametrów wybuchowości pyłu: maksymalnego ciśnienia wybuchu, maksymalnej szybkości narastania ciśnienia wybuchu i stałej  $K_{St\ max}$ . Wprowadzają [6] metodologię szacowania tych parametrów opierającą się na statystycznych metodach opracowywania wyników pomiarów i procedurę korekcyjną zmniejszającą rozrzut wyników doświadczalnych. Przedstawiają także [7] wyniki pomiarów turbulencji w standardowej komorze o objętości 1 m<sup>3</sup>, przeznaczonej do oznaczania parametrów wybuchowości pyłów. Wskazują trudności, na które napotyka się budując standardowe stanowisko badawcze.

Nową metodologią pomiarów laminarnej szybkości spalania w mieszaninach pyłowo-powietrznych zajmują się prace [3-5]. Opisano w nich metodologię oznaczania tego parametru wykorzystującą wyniki doświadczeń w standardowej sferze 20-l przeznaczonej do oznaczania parametrów wybuchowości pyłów. Przedstawiono w nich także wyniki szacowania laminarnej szybkości spalania i laminarnej grubości płomienia dwóch pyłów. Wskazano również trudności, na które napotyka ta metodologia.

## ZARYS METOD OZNACZANIA PARAMETRÓW ZAPALNOŚCI I WYBUCHOWOŚCI PYŁÓW PRZEMYSŁOWYCH

Rozwojowi przemysłu towarzyszy stały wzrost liczby stosowanych surowców i materiałów. Zaskakująco często pyły tych materiałów wykazują właściwości wybuchowe stwarzając zagrożenie wybuchem w coraz liczniejszych procesach produkcyjnych.

Z dużą różnorodnością pyłów wiąże się bardzo duże zróżnicowanie ich właściwości zapalnych i wybuchowych. O tym zróżnicowaniu decyduje nie tylko wielość materiałów, których pyły wykazują właściwości wybuchowe. Dobrze znaną cechą pyłów, odróżniającą je od gazów, jest zależność tych właściwości nie tylko od materiału pyłu, ale także od innych czynników takich jak rozdrobnienie, zawartość wilgoci lub obecność zanieczyszczeń, nawet w niewielkich ilościach. W tym kontekście znajomość właściwości wybuchowych pyłów ma znaczenie podstawowe dla prawidłowej oceny zagrożenia związanego z obecnością pyłów palnych.

Systematyczne badanie właściwości wybuchowych pyłów rozpoczęto stosunkowo niedawno, bo w drugiej połowie XX wieku. Olbrzymią pracę w tym zakresie wykonał Wolfgang Bartknecht, który wraz ze współpracownikami stworzył podstawy metodologii badania pyłów. Metodologia ta została zaadoptowana w normach, początkowo krajowych, nieco później normach Międzynarodowego Komitetu Elektrotechnicznego IEC i w końcu w normach europejskich EN. Zbliżoną metodologię zawierają także amerykańskie normy ASTM. Oczywiście, badaniem właściwości zapalnych i wybuchowych zajmowano się także w innych krajach, w tym w Polsce. Na Politechnice Warszawskiej zajmuje się nimi grupa kierowana przez profesora Piotra Wolańskiego. Badania takie były też prowadzone na Politechnice Wrocławskiej pod kierunkiem profesora Mieczysława Zembrzuskiego, a później, do czasów obecnych profesora Włodzimierza Kordylewskiego. W końcu lat 60-tych ubiegłego wieku w Kopalni Doświadczalnej Barbara Głównego Instytutu Górnictwa zostało utworzone Laboratorium Wybuchowości Pyłów Przemysłowych. Pracami Laboratorium kierowali dr Jan Śliż i profesor Kazimierz Lebecki.

W wyniku długoletnich badań został sformułowany podstawowy zestaw parametrów zapalności i wybuchowości pyłów przemysłowych. Ich definicje i procedury oznaczania zostały opisane w normach europejskich. Na zestaw ten składają się obecnie

- maksymalne ciśnienie wybuchu  $p_{max}$ ,
- maksymalna szybkość narastania ciśnienia wybuchu  $(dp/dt)_{max}$  i stała  $K_{St max}$ ,
- dolna granica wybuchowości  $DGW$ ,
- minimalna temperatura zapłonu obłoku pyłu  $T_{CL}$ ,
- minimalna temperatura zapłonu warstwy pyłu  $T_{Smm}$ ,
- minimalna energia zapłonu obłoku pyłu  $MIE$ ,
- graniczne dla wybuchu stężenie tlenu  $GST$ ,
- skłonność nagromadzeń pyłu do samozapalenia  $T_{SI}$ ,
- rezystywność pyłu w warstwach  $\rho$ .

Określając liczbowo właściwości wybuchowe pyłów celowo używa się terminu *parametry*, aby odróżnić go od wielkości fizycznych. Inaczej niż w przypadku tych ostatnich, parametry zapalności i wybuchowości pyłów zależą nie tylko od właściwości badanego pyłu, ale także od metody oznaczania. Z tego powodu metody te muszą być precyzyjnie zdefiniowane i przestrzegane podczas badań, bowiem tylko wtedy wyniki uzyskiwane w różnych laboratoriach mogą być porównywane. Co więcej, na wartościach tych parametrów, oznaczonych w znormalizowany sposób opierają się rekomendacje dotyczące oceny zagrożenia wybuchem pyłów i sposobów ograniczania tego zagrożenia. Poprawność stosowania standardowych metod oznaczania parametrów zapalności i wybuchowości i dobre zrozumienie uzyskiwanych wyników ma zatem znaczenie podstawowe.

Prace wymienione w poprzednim rozdziale dotyczą metod oznaczania maksymalnego ciśnienia wybuchu  $p_{max}$ , maksymalnej szybkości narastania ciśnienia wybuchu  $(dp/dt)_{max}$  i stałej  $K_{St max}$ , jak również minimalnej temperatury zapłonu warstwy pyłu. Tematyka prac [3-5] wychodzi poza zakres standardowych parametrów. Dotyczy pomiaru fundamentalnej właściwości mieszanin palnych: laminarnej szybkości spalania  $S_L$ .

### MAKSYMALNE CIŚNIENIE I SZYBKOŚĆ NARASTANIA CIŚNIENIA WYBUCHU, STAŁA $K_{St\ max}$

Zgodnie z normami europejskimi serii PN-EN 14034, normą amerykańską ASTM E1226-12a i międzynarodową normą ISO 6184/1 standardową aparaturą służącą do oznaczania tych parametrów jest komora badawcza o objętości  $1\text{ m}^3$ . Oznaczenie maksymalnego ciśnienia wybuchu i maksymalnej szybkości narastania ciśnienia wybuchu, równej w tym przypadku stałej  $K_{St\ max}$ , polega na wykonaniu jednej serii wybuchów zmieniając koncentrację nominalną pyłu, czyli ilość pyłu rozpylanego w zamkniętej przestrzeni komory. Jako  $p_{max}$  przyjmuje się największą wartość uzyskanego ciśnienia. Podobnie,  $K_{St\ max}$  jest równe największej wartości szybkości narastania ciśnienia. Normy nie podają sposobu oszacowania niepewności oznaczenia tych parametrów.

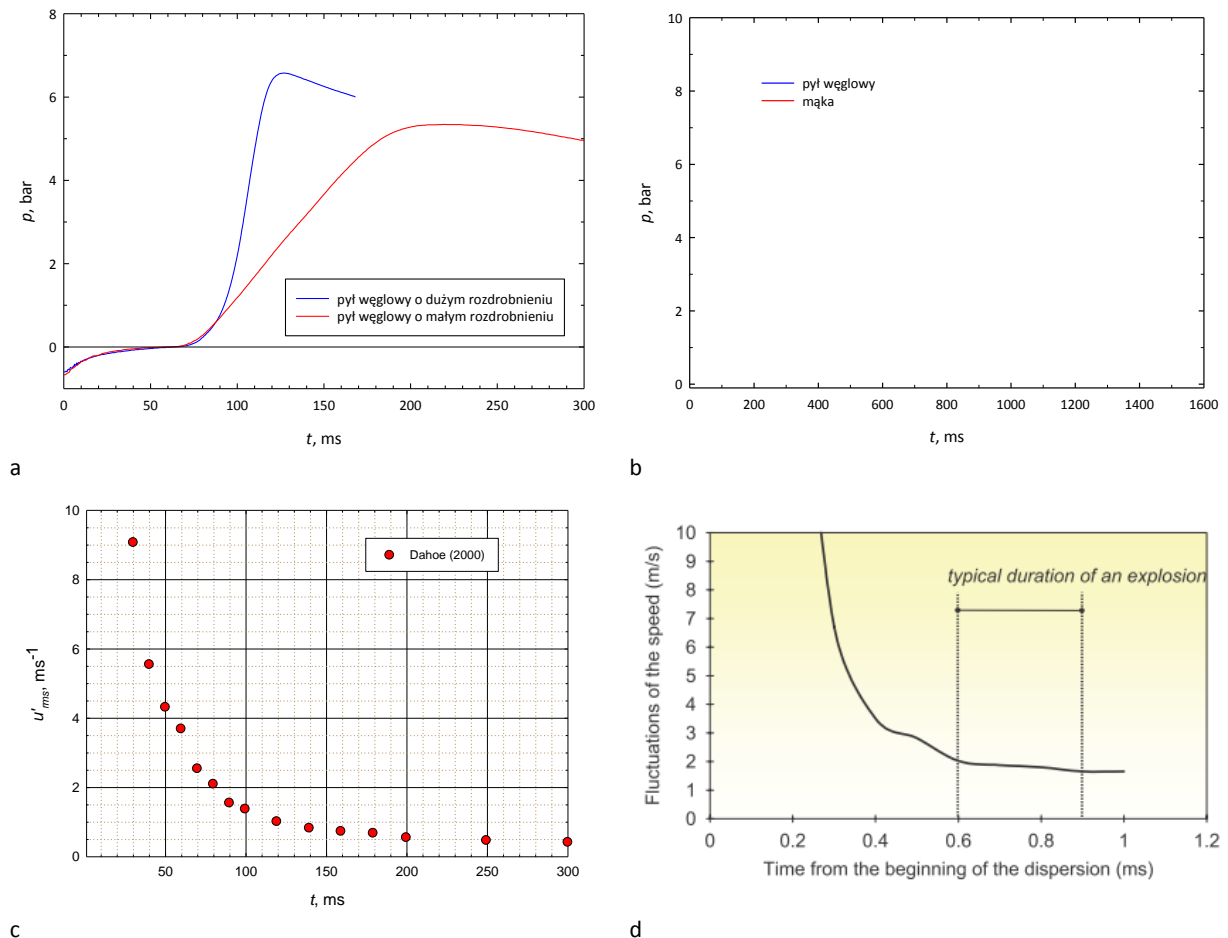
Wspomniane normy dopuszczają możliwość użycia innej aparatury niż standardowa komora badawcza o objętości  $1\text{ m}^3$ , pod warunkiem jednak, że zgodność wyników w takiej aparaturze z wynikami uzyskanymi w standardowej komorze zostanie wykazana. Taka zgodność została wykazana dla komory sferycznej o objętości  $20\text{ dm}^3$ , której budowa i zasada działania zostały opisane w załączniku norm serii PN-EN 14034. W tym przypadku należy jednak wykonać nie jedną a trzy serie testów. Wynika to z dużo większego rozrzutu punktów doświadczalnych uzyskiwanych w testach w tej aparaturze. Jako wynik badania przyjmuje się średnią arytmetyczną z najwyższych wyników  $p_{max}$  i  $(dp/dt)_{max}$  uzyskanych w każdej z serii. Tu także norma nie podaje sposobu oszacowania niepewności oznaczenia. Firma Kühner AG, twórca i pierwszy producent sfer 20-l, w instrukcji obsługi do swojej aparatury podaje pewne oszacowanie niepewności oznaczenia tych parametrów. Maksymalne ciśnienia uzyskane w każdej z trzech serii nie mogą różnić się o więcej niż 10% wartości. W przypadku  $(dp/dt)_{max}$  i  $K_{St\ max}$  dopuszczalny rozrzut największych wartości w poszczególnych seriach zależy od uzyskanych wartości tych parametrów w sposób podany w tabeli 1.

Tabela 1

$(dp/dt)_{max}$ $\text{bar}\cdot\text{s}^{-1}$	$K_{St\ max}$ $\text{m}\cdot\text{bar}\cdot\text{s}^{-1}$	Dopuszczalne odchylenie
$\leq 185$	$\leq 50$	$\pm 30\%$
186 – 370	51 – 100	$\pm 20\%$
371 – 740	101 – 200	$\pm 12\%$
$> 740$	$> 200$	$\pm 10\%$

Komora sferyczna 20-l, choć dopuszczona do stosowania jako rozwiązanie alternatywne, stała się aparaturą zdecydowanie najczęściej stosowaną do oznaczania parametrów wybuchowości pyłów przemysłowych. Większość dostępnych wyników pochodzi właśnie z tej aparatury. Dzieje się tak, ponieważ przeprowadzenie badań w sferze 20-l jest znacznie łatwiejsze i mniej kosztowne niż w standardowej komorze o objętości  $1\text{ m}^3$ . Zdarza się także, że koszt pyłu odgrywa istotną rolę. Do przeprowadzenia badań w sferze 20-l potrzeba ok. 10-krotnie mniej materiału. Czynniki te decydują o popularności sfery mimo, że znane są trudności związane z prowadzeniem w niej oznaczeń.

Jedną z tych trudności jest duża zmienność warunków panujących w sferze 20-l podczas trwania wybuchu. Podmuch powietrza z pyłem umożliwiający utworzenie jednorodnego obłoku w przestrzeni badawczej wywołuje intensywną turbulencję. Podczas zapłonu i następującego po nim wybuchu intensywność turbulencji zmienia się znacząco. Przeprowadzone pomiary wykazały, że średniokwadratowa prędkość pulsacyjna  $u'_{rms}$  w chwili zapłonu jest równa ok. 3,5 m/s (rys. 1c). Typowy rozwój wybuchu trwa od kilkudziesięciu do kilkuset milisekund. W tym czasie wartość  $u'_{rms}$  spada do 1 m/s. Inaczej przedstawia się sytuacja w standardowej komorze  $1\text{ m}^3$  (rys. 1d). Podczas trwania wybuchu intensywność turbulencji zmienia się nieznacznie. Wartość  $u'_{rms}$  utrzymuje się na poziomie ok. 2 m/s.



Rys. 1. Zmiany ciśnienia podczas wybuchu pyłu (a) w sferze 20-l i (b) w komorze 1m<sup>3</sup> oraz średniokwadratowa prędkość pulsacyjna (c) w sferze 20-l i (d) w komorze 1m<sup>3</sup>

Intensywność turbulencji ma bardzo silny wpływ na dynamikę wybuchu wyrażaną maksymalną szybkością narastania ciśnienia wybuchu i stałą  $K_{St\ max}$ . W praktyce przemysłowej znajomość tego ostatniego parametru jest bardzo ważna, ponieważ niesie on informacje niezbędne do prawidłowego zabezpieczenia instalacji przed skutkami wybuchu pyłu.

Te i kilka innych trudności w prowadzeniu badań w sferze 20-l sprawiają, że w dalszym ciągu rozstrzygające wartości mają badania wybuchowości pyłów w standardowej komorze 1 m<sup>3</sup>. Stwierdzenie takie zostało jawnie sformułowane w amerykańskiej normie ASTM E1226-12a. Niestety, liczba tego typu urządzeń tak w Unii Europejskiej jak i poza nią jest niewielka. Jedną z przyczyn takiego stanu rzeczy, choć nie jedyną, jest brak wystarczająco dokładnego opisu budowy tego urządzenia. Opisy zawarte w wymienionych normach są niewystarczające.

#### MINIMALNA TEMPERATURA ZAPŁONU WARSTWY PYŁU

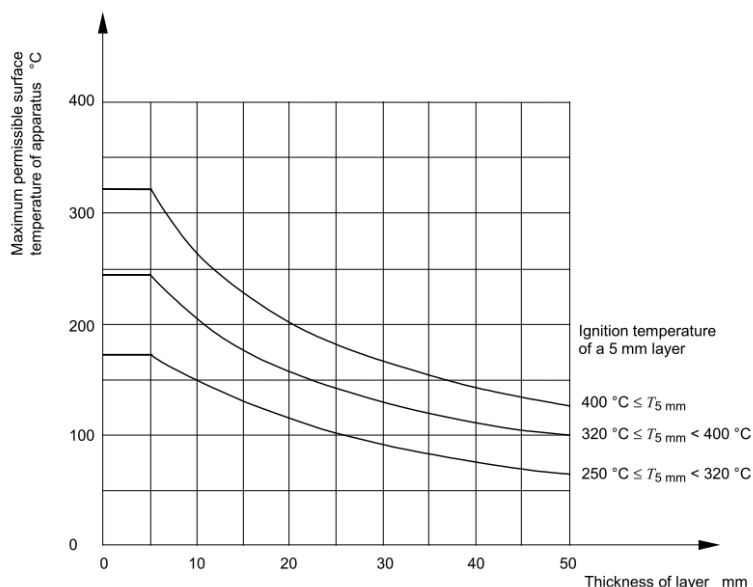
Minimalna temperatura zapłonu warstwy pyłu  $T_{5mm}$  jest parametrem pozwalającym ocenić zagrożenie związane z osiadaniami pyłu na powierzchniach o podwyższonej temperaturze, np. obudowach pracujących urządzeń. Określa ona w jakich warunkach może dojść do zapoczątkowania tlenia w warstwie pyłu osiadłego. Parametr ten ma bezpośredni związek z zagrożeniem wybuchem pyłu. Jak pokazuje praktyka warstwy i nagromadzenia tłącego się pyłu mogą stać się przyczyną zainicjowania wybuchu pyłu, np. w wyniku niewłaściwego sposobu gaszenia.

Procedura oznaczania minimalnej temperatury zapłonu warstwy pyłu została opisana w normach europejskich PN-EN 50281-2-1 i PN-EN ISO IEC 80079-20-2. Taką samą procedurę zawiera norma amerykańska ASTM E2021-15, choć w tej normie zalecane jest zbadanie innej grubości warstwy pyłu. Oznaczenie polega na



umieszczeniu warstwy badanego pyłu na płycie grzejnej rozgrzanej do zadanej temperatury. Podczas całego badania jest utrzymywana stała temperatura płyty. Warstwę pyłu formuje się w przestrzeni utworzonej przez płytę i umieszczony na niej metalowy pierścień o wysokości 5 mm (normy europejskie) lub 12,5 mm (norma amerykańska). Podczas badania obserwuje się zachowanie pyłu i zmiany temperatury we wnętrzu warstwy. Przeprowadza się serię takich badań poszukując najniższej temperatury płyty, w której nastąpiło zatlenie pyłu i najwyższej, w której do zatlenia nie dochodzi.

Opisane warunki prowadzenia oznaczenia nie w pełni oddają typowe warunki panujące w instalacjach przemysłowych. Bardzo często gorące powierzchnie to obudowy urządzeń pracujących w instalacjach przemysłowych. Praca urządzenia wiąże się z wytwarzaniem ciepła. Ciepło to jest przekazywane do obudowy urządzenia, w wyniku czego temperatura obudowy wzrasta. Następuje zatem wymiana ciepła między obudową urządzenia i otoczeniem. W pewnej temperaturze obudowy szybkość przekazywania jej ciepła przez pracujące urządzenie zrównuje się z szybkością oddawania ciepła do otoczenia. Ustala się pewna równowaga termiczna i temperatura obudowy ustala się. Warstwa pyłu osiadłego tworząca się na obudowie urządzenia zakłóca tę równowagę. Pył izoluje obudowę od otoczenia utrudniając oddawanie ciepła. W rezultacie temperatura obudowy wzrasta zależnie od właściwości termicznych pyłu i grubości warstwy. To zjawisko uwzględnia się szacując maksymalną dopuszczalną temperaturę powierzchni, na których tworzą się warstwy rozpatrywanego pyłu. Jeżeli grubości tych warstw nie przekraczają 5 mm, jako maksymalną dopuszczalną temperaturę powierzchni przyjmuje się temperaturę niższą o 75 K od minimalnej temperatury zapłonu warstwy pyłu  $T_{5mm}$ . Jeżeli oczekuje się warstw pyłu osiadłego o większej grubości, maksymalną dopuszczalną temperaturę należy dodatkowo obniżyć. Do szacowania tej temperatury należy zastosować diagramy przedstawione na Rys. 2. Diagramy te pozwalają szacować maksymalną dopuszczalną temperaturę dla warstw pyłu osiadłego o grubości nie większej niż 50 mm. Jeżeli warstwy te mają grubości większe, należy przeprowadzić bezpośrednie badanie w warunkach odpowiadających takiej sytuacji.



Rys. 2. Diagramy umożliwiające szacowanie maksymalnej dopuszczalnej temperatury powierzchni dla warstw pyłu osiadłego o grubościach nie przekraczających 50 mm

#### POMIAR LAMINARNEJ SZYBKOŚCI SPALANIA W MIESZANINACH PYŁOWO-POWIETRZNYCH

Stała  $K_{St\ max}$  jest powszechnie stosowany parametrem pozwalającym ocenić dynamikę wybuchu mieszaniny pył-powietrze. Ocena dynamiki wybuchu ma podstawowe znaczenie w praktyce. Służy do szacowania skutków wybuchu, doboru systemów ochronnych ograniczających jego rozwój, zasięg i konsekwencje. Użyteczność stałej  $K_{St\ max}$  zasadza się na założeniu uniwersalności. Przyjmuje się, że  $K_{St\ max}$  nie zależy od objętości, w której rozwija się wybuch. Dzięki temu wyniki uzyskane w aparaturze laboratoryjnej mogą być wykorzystywane

w praktyce, gdzie objętości przestrzeni wewnętrznych instalacji są znacznie większe. Można wykazać, że niezależność stałej  $K_{St,max}$  od objętości, czyli spełnienie tzw. prawa pierwiastka sześciennego, ma miejsce tylko wtedy, kiedy spełnione są pewne warunki:

- Istnieje geometryczne podobieństwo rozpatrywanych objętości
- Grubość płomienia jest zanedbywalnie mała w stosunku do rozmiarów przestrzeni, w której rozwija się wybuchu
- Szybkość spalania jako funkcja ciśnienia i temperatury nie zależy od objętości
- Zapłon mieszaniny pył-powietrze następuje w niewielkim obszarze, w środku przestrzeni.

W praktyce większość z tych warunków nie jest spełniona. Dodatkowo, stała  $K_{St,max}$  jest arbitralną miarą dynamiki wybuchu, ponieważ warunki, w których jest oznaczana (zwłaszcza intensywność turbulencji) są arbitralne. Świadomość opisanych trudności i zastrzeżeń powoduje, że stale trwają poszukiwania bardziej obiektywnego parametru charakteryzującego dynamikę wybuchu mieszaniny pył-powietrze. Parametrem takim mogłaby być laminarna szybkość spalania  $S_L$ .

Laminarna prędkość spalania jest fundamentalną właściwością mieszanin palnych także z innego powodu. Jedną z podstawowych trudności w modelowaniu zjawiska spalania deflagacyjnego w mieszaninie pył-powietrze jest właściwy opis przebiegu wydzielania energii cieplnej w przemianie chemicznej mieszaniny palnej w produkty spalania. W tym celu najczęściej stosuje się modele bazujące na uproszczonym opisie propagacji frontu płomienia, uwzględniające pewną grupę zjawisk mających wpływ na tę szybkość. Przyjmuje się, że front płomienia przemieszcza się z szybkością równą turbulentnej szybkości spalania  $S_T$ , która jest funkcją właściwości mieszaniny palnej, takich jak koncentracja pyłu, laminarna szybkość spalania  $S_L$ , laminarna grubość płomienia  $\delta_L$ , pola przepływu definowanego średniokwadratową prędkością pulsacyjną  $u'_{rms}$  i charakterystyczną skalą długości turbulencji  $l_T$ , a także temperatury i ciśnienia. W ten sposób oddziela się wpływ właściwości materiału palnego od pozostałych czynników decydujących o szybkości wydzielania energii w reakcji spalania. Znajomość laminarnej szybkości spalania, a dokładniej zależności laminarnej szybkości spalania od koncentracji pyłu, ma zatem kluczowe znaczenie w symulacjach numerycznych wybuchu mieszanin pyłowo-powietrznych.

Tak więc laminarna szybkość spalania w mieszaninie pył-powietrze pełni bardzo ważną rolę tak w zastosowaniach praktycznych jak i symulacjach numerycznych zjawiska wybuchu pyłu. Niestety, oznaczenie tego parametru jest bardzo trudne. Obłok pyłu jest zawieszoną cząstką ciała stałego, które w sposób naturalny opadają w wyniku działania grawitacji. Utworzenie obłoku pył następuje na ogół w wyniku intensywnego podmuch powietrza, który zawsze wiąże się z przepływem turbulentnym.

Obecnie najczęściej stosowaną metodą wytwarzania mieszaniny pył-powietrze w przepływie laminarnym i pomiaru laminarnej szybkości spalania jest metoda wykorzystująca swobodny spadek pyłu w stacjonarnej atmosferze gazowej. Pył jest równomiernie podawany w górnej części kanału tak, aby opadając utworzył w przestrzeni wewnętrznej kanału obłok o możliwie jednorodnej koncentracji. Już samo utworzenie jednorodnego obłoku pyłu w takich warunkach jest bardzo trudne. Dodatkowo trudności w prowadzeniu pomiaru  $S_L$  wiążą się z wpływem ścian kanału na propagację frontu płomienia, wpływem unoszenia i innymi efektami.

Opisane trudności sprawiają, że obecnie znane są laminarne szybkości spalania tylko nielicznych mieszanin pyłowych, a ich wartości uzyskane w różnych eksperymentach różnią się znacznie. Trzeba więc przyjąć, że w tych przypadkach dysponujemy tylko pewnym oszacowaniem laminarnej szybkości spalania.

## ZASTOSOWANIE WYNIKÓW BADAŃ DO POGŁĘBIONEJ INTERPRETACJI OZNACZEŃ PARAMETRÓW ZAPALNOŚCI I WYBUCHOWOŚCI PYŁÓW PRZEMYSŁOWYCH

### MAKSYMALNE CIŚNIENIE I SZYBKOŚĆ NARASTANIA CIŚNIENIA WYBUCHU, STAŁA $K_{ST,MAX}$

Maksymalne ciśnienie wybuchu i maksymalna szybkość narastania ciśnienia wybuchu wraz ze stałą  $K_{St,max}$  są najważniejszymi parametrami określającymi spodziewane skutki wybuchu pyłu. Dostarczają informacji o podstawowym znaczeniu w procesie oceny zagrożenia wybuchem pyłu w przemyśle. Służą też do doboru metod ochrony przed wybuchem i ograniczania jego skutków.

W publikacjach [6-7] przedstawiono wyniki prac, których celem była poprawa jakości oznaczania wspomnianych parametrów wybuchowości. Charakter tych prac był dwójakiego rodzaju:

- Poprawa metod opracowywania wyników oznaczeń parametrów wybuchowości pyłów uzyskiwanych znormalizowanymi metodami [6]. Zaproponowano dwie nowe metody, które poprawiają dokładność oznaczenia tych parametrów.
  - Opartą na statystycznych metodach opracowania wyników pomiarów metodę obliczania maksymalnego ciśnienia wybuchu i maksymalnej szybkości narastania ciśnienia wybuchu. W odróżnieniu od metody obecnie proponowanej w normach, w której spośród wszystkich pomiarów wykorzystuje się tylko jeden punkt każdej serii – punkt o największej wartości, nowa metoda wykorzystuje informacje zawarte we wszystkich punktach doświadczalnych. Pozwala także na oszacowanie niepewności oznaczenia  $p_{max}$ ,  $(dp/dt)_{max}$  i stałej  $K_{St max}$  w sposób uwzględniający zarówno nieznaną kształtu rzeczywistej zależności tych parametrów od koncentracji nominalnej pyłu, jak i rozrzut punktów doświadczalnych, charakterystyczny zwłaszcza dla wyników uzyskiwanych w sferze 20-l.
  - Metodę korekcji maksymalnej szybkości narastania ciśnienia wybuchu i stałej  $K_{St max}$  uwzględniającą intensywność turbulencji w przestrzeni roboczej aparatury podczas wybuchów testowych. Metoda może mieć różne zastosowania. Może posłużyć do zmniejszenia rozrzutu punktów doświadczalnych spowodowanego różnym opóźnieniem rozwoju wybuchu. Pozwala na zastosowanie różnych dysz dyspersyjnych w standardowej sferze 20-l, dostosowanych do specyficznych właściwości badanych pyłów, np. pyłów o nieregularnym kształcie cząstek, włókien itp. Różna intensywność turbulencji generowanej przez dysze może być skompensowana za pomocą tej metody korekcji.
- Zbudowano komorę badawczą o objętości  $1\text{ m}^3$ , która spełnia wszystkie wymagania określone w normach serii PN-EN 14034, a także normach ASTM E1226-12a i ISO 6184/1 [7]. Za pomocą zaprojektowanej głowicy pomiarowej, tzw. *Bi-Directional Velocity Probe* BDVP, wykonano szczegółowe pomiary przepływu powietrza wywołanego podmuchem w wyniku zadziałania systemu dyspersji pyłu. Pomiary wykonano w wielu punktach przestrzeni wewnętrznej komory, w każdym punkcie mierząc dwie składowe prędkości (pomiar składowych prędkości w dwóch prostopadłych kierunkach). Pomiary wykazały, że w czasie rozwoju wybuchu turbulencja w przestrzeni wewnętrznej jest jednorodna i izotropowa. Intensywność turbulencji jest dwukrotnie mniejsza niż ta sama intensywność w standardowej sferze 20-l. Ta różnica w intensywności turbulencji jest powodem rozbieżności wyników oznaczenia maksymalnej szybkości narastania ciśnienia wybuchu w zbudowanej komorze  $1\text{ m}^3$  i sferze 20-l. Przeprowadzona analiza przyczyn zbyt małej intensywności turbulencji wykazała, że odpowiedzialną za to jest konstrukcja szybko działającego zaworu, który otwiera dopływ sprężonego powietrza z pyłem ze zbiornika pyłu do przestrzeni roboczej komory. Uzyskane wyniki potwierdzają potrzebę bardziej precyzyjnego opisu budowy standardowej komory o objętości  $1\text{ m}^3$ , wskazując jednocześnie na część aparatury o kluczowym znaczeniu.

**Publikacja 6:** Dyduch Z., Pękalski A.: *Methods for more accurate determination of explosion severity parameters*, Loss Prev. Proc. Ind., **26**, 2013, 1002-1007

**Publikacja 7:** Dyduch Z., Toman A., Adamus W.: *Measurements of turbulence intensity in the standard  $1\text{ m}^3$  vessel*, Loss Prev. Proc. Ind., **40**, 2016, 180-187

#### MINIMALNA TEMPERATURA ZAPŁONU WARSTWY PYŁU

Minimalna temperatura zapłonu warstwy pyłu jest parametrem pozwalającym ocenić skłonność warstw pyłu osiadłego na powierzchniach o podwyższonej temperaturze do zatlenia. Sposób oznaczania tego parametru opisują normy europejskie PN-EN 50281-2-1 i PN-EN ISO IEC 80079-20-2, a także norma amerykańska ASTM E2021-15. Metody opisane w tych normach są w zasadzie takie same. Badanie warstwy pyłu wykonuje się na płycie grzejnej, której temperatura podczas badania jest stała. Taki sposób badania nie w pełni oddaje rzeczywiste warunki, które najczęściej mają miejsce w przemyśle. Ciepło wydzielane podczas pracy urządzenia

powoduje wzrost temperatury obudowy. W wyniku osiadania pyłu na obudowie jej temperatura nie jest stała, stały jest natomiast dopływ ciepła, strumień ciepła do obudowy od pracującego urządzenia. Tę różnicę w warunkach jakim podlega warstwa pyłu osiadłego uwzględnia się przez wprowadzenie dodatkowego marginesu bezpieczeństwa (Rys. 2).

Chcąc sprawdzić, czy zalecany margines bezpieczeństwa jest wystarczający w ramach pracy opisanej w publikacji [1] wykonano serię oznaczeń minimalnej temperatury zapłonu warstwy pyłu przy stałej temperaturze płyty grzejnej i stałym strumieniu ciepła dostarczanego do płyty. Oznaczenia wykonano dla dwóch pyłów w szerokim zakresie grubości warstw: od 5 mm do 50 mm. Porównanie wyników uzyskanych przy stałej temperaturze płyty i stałym strumieniu ciepła prowadzi do wniosku, że minimalne temperatury zapłonu warstwy pyłu uzyskane drugą z metod są znacznie niższe. W niektórych przypadkach nawet dodanie marginesu bezpieczeństwa zalecanego przez normę PN-EN 60079-14 może być niewystarczające.

Aby lepiej zrozumieć naturę różnicy wyników uzyskanych podczas oznaczania minimalnej temperatury zapłonu warstwy pyłów posługując się standardową metodą ze stałą temperaturą płyty grzejnej i stałym strumieniem ciepła dostarczanym do płyty, przeprowadzono symulacje numeryczne wczesnej fazy rozwoju tlenia w warstwie pyłu (publikacja [2]). Wykorzystano w tym celu prosty jednowymiarowy model zjawiska. Przewidywania modelu porównano następnie z wynikami doświadczalnymi uzyskanymi przy stałym strumieniu ciepła z gorącej płyty. Porównanie wykazało zadowalającą zgodność w obszarze cienkich warstw pyłu. Jednak w miarę zwiększania grubości warstwy pyłu model przewiduje szybszy spadek minimalnej temperatury zapłonu warstwy pyłu niż w przypadku danych doświadczalnych. Podążając w kierunku warstw o większej grubości rozbieżność pomiędzy modelem a eksperymentem staje się znaczna. Zidentyfikowano przyczynę rozbieżności, która tkwi w różnym charakterze zjawiska transportu ciepła w warstwie pyłu, zależnie grubości warstwy. Jeżeli grubości warstw pyłu są znaczące w porównaniu z ich wymiarami poziomymi, przepływ ciepła w warstwie ma charakter dwuwymiarowy, odmienny niż ten przyjęty w jednowymiarowym modelu zjawiska. Odwołując się do praktyki można oczekiwać, że rzeczywiste warstwy pyłu najczęściej występujące w przemyśle spełniają raczej założenia modelu jednowymiarowego niż odpowiadają konfiguracji standardowej aparatury przeznaczonej do oznaczania minimalnej temperatury zapłonu warstwy pyłu. Powierzchnie pokryte warstwą pyłu osiadłego są na ogół duże w porównaniu z grubością warstwy.

Uzyskane wyniki wskazują, że w niektórych przypadkach standardowa metoda oznaczania minimalnej temperatury zapłonu warstwy pyłu może prowadzić do niewłaściwego oszacowania zagrożenia, przy czym może to mieć miejsce zarówno w przypadku oznaczania tego parametru dla warstw pyłu o dużych, jak i małych grubościach.

**Publikacja 1:** Lebecki K., Dyduch Z., Fibich A., Śliż J.: *Ignition of a dust layer by a constant heat flux*, J. Loss Prev. Proc. Ind., **16**, No. 4, 2003

**Publikacja 2:** Dyduch Z., Majcher B.: *Ignition of a dust layer by a constant heat flux-heat transport in the layer*, J. Loss Prev. Proc. Ind., **19**, No. 2-3, 2006

#### POMIAR LAMINARNEJ SZYBKości SPALANIA W MIESZANINACH PYŁOWO-POWIETRZNYCH

Laminarna szybkość spalania  $S_L$  odgrywa kluczową rolę w ocenie właściwości wybuchowych mieszanin gazów, par cieczy palnych, a także pyłów z powietrzem. W związku z tym dostępność stosunkowo prostej metody wyznaczania zależności  $S_L$  od koncentracji pyłu jest bardzo potrzebna.

Pomiar laminarnej szybkości spalania mieszanin pyłowo-powietrznych wiąże się z dość poważnymi trudnościami wynikającymi głównie z problemów związanych z uzyskaniem jednorodnych obłoków pyłu w nieruchomym ośrodku gazowym lub ośrodku z przepływem laminarnym. Naturalną postacią występowania pyłów są warstwy i nagromadzenia pyłu osiadłego. Utworzenie jednorodnego obłoku wymaga czynnika powodującego uniesienie pyłu, np. podmuchu powietrza. Siłą rzeczy czynnik taki zaburza stan fazy gazowej wprowadzając niepożądaną w tym wypadku turbulencję. Dlatego duże nadzieje wiąże się z metodą oznaczania laminarnej szybkości spalania zaproponowaną przez A. Dahoe. Metoda ta polega na wykorzystaniu pomiarów zmian ciśnienia w czasie wybuchu mieszaniny pyłowo-powietrznej w zamkniętej, sferycznej objętości oraz

modelu wybuchu opartego na zasadach zachowania w ujęciu całkowym. Dopasowanie parametrów modelu do zmierzonych zmian ciśnienia pozwala wyznaczyć laminarną szybkość spalania w mieszaninie pył-powietrznej, a także inne parametry związane z  $S_L$ . Zaletą metody Dahoe jest łatwość uzyskania przebiegów zmian ciśnienia w czasie wybuchu. Można w tym celu wykorzystać standardową sferę 20-l. Pewne trudności stwarza natomiast wyznaczanie laminarnej szybkości spalania za pomocą modelu wybuchu. Procedura dopasowania parametrów modelu do wyników doświadczalnych naraża pewne problemy tak natury numerycznej, jak i interpretacyjnej.

Publikacje [3-5] zawierają wyniki prac mających na celu implementację metody Dahoe i wykorzystanie jej do wyznaczenia laminarnej szybkości spalania w mieszaninach pył-powietrze. Wykonano wiele serii doświadczeń z pyłem Lycopodium i skrobią kukurydzianą o różnej zawartości wilgoci, w standardowej sferze 20-l, w szerokim zakresie koncentracji nominalnych pyłu. Aby uzyskać punktowe źródło zapłonu wymagane przez modele, typowe główki zapalcze zastąpiono wyładowaniem iskrowym o energii 6 J. Uzyskane wyniki ujawniły konieczność uzupełnienia modelu wybuchu o dodatkowy parametr. Przebiegi zmian ciśnienia wybuchu w czasie charakteryzowały się zmiennym czasem między momentem wyzwolenia iskry elektrycznej i początkiem rozwoju wybuchu. Wprowadzono dodatkowy człon do równania modelu, który pozwolił uniezależnić procedurę dopasowywania parametrów od czasu opóźnienia zapłonu. Sprawdzono dwa warianty kluczowej w tej metodzie zależności turbulentnej szybkości spalania  $S_T$  od laminarnej szybkości spalania  $S_L$ , ciśnienia i temperatury oraz parametrów opisujących turbulencję: średniokwadratowej szybkości pulsacyjnej  $u'_{rms}$  i charakterystycznej skali długości turbulencji  $l_T$ . W przypadku jednej z zależności uzyskano zadowalającą zgodność  $S_L$  z wynikami uzyskanymi innymi metodami w obszarze małych koncentracji pyłu. W obszarze większych koncentracji, powyżej  $300 \text{ g/m}^3$  porównanie nie było możliwe, ponieważ takie dane nie są dostępne. Jednocześnie zwrócono uwagę na trudności napotymane podczas dopasowywania parametrów. Uzyskanie zbieżności iteracyjnej procedury dopasowywania parametrów było bardzo trudne. Zważywszy, że w badaniach użyto pyłów bardzo łatwo poddających się badaniom wybuchowości należy oczekiwać, że w przypadku innych pyłów trudności te mogą być znacznie większe. Jako źródło trudności wskazano złożoność procedury dopasowania parametrów (jednoczesne dopasowywanie 9 parametrów), a także niedoskonałość zależności  $S_T$  od parametrów turbulencji i laminarnej szybkości spalania.

**Publikacja 3:** Dyduch Z., Majcher-Morawiec B.: *Oznaczanie prędkości spalania w mieszaninach pyłowo-powietrznych z wykorzystaniem modelu wybuchu w zamkniętej objętości*, Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko, **2**, 2007

**Publikacja 4:** Dyduch Z.: *Szacowanie laminarnej szybkości spalania mieszanin pył-powietrze na podstawie pomiarów ciśnienia w komorze sferycznej*, Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko, **4**, 2009

**Publikacja 5:** Dyduch Z., Skjold T.: *An assessment of the laminar burning velocity in dust/air mixtures based on a model for dust explosions in closed 20-litre vessels*, Proceedings of the 8<sup>th</sup> Eighth International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions, Yokohama 5-10 September 2010

#### SZCZEGÓŁOWY OPIS PUBLIKACJI STANOWIĄCYCH PODSTAWĘ OSIĄGNIĘCIA NAUKOWEGO WRAZ

##### Z KOMENTARZEM AUTORA

Poniżej został przedstawiony szczegółowy opis publikacji stanowiących podstawę osiągnięcia naukowego. Prace te zostały przypisane do grup, odpowiadających celom prowadzonych przeze mnie badań, zgodnie z poprzednim rozdziałem.

#### MAKSYMALNE CIŚNIENIE I SZYBKOŚĆ NARASTANIA CIŚNIENIA WYBUCHU, STAŁA $K_{ST \text{ MAX}}$

**Publikacja 6:** Dyduch Z., Pękalski A.: *Methods for more accurate determination of explosion severity parameters*, Loss Prev. Proc. Ind., **26**, 2013, 1002-1007

W publikacji zaproponowano dwie metody poprawiające sposób oznaczania parametrów wybuchowości pyłu na podstawie wyników doświadczalnych. *Metoda statystyczna* w oszacowaniu wartości maksymalnego ciśnienia wybuchu  $p_{max}$  i maksymalnej szybkości narastania ciśnienia wybuchu  $(dp/dt)_{max}$  wykorzystuje

informacje zawarte we wszystkich punktach doświadczalnych. Dodatkowo, metoda pozwala oszacować niepewność pomiarów biorąc pod uwagę zarówno rozrzut punktów doświadczalnych, jak i arbitralny wybór funkcji wykorzystywanej do przedstawienia zależności  $p_{max}$  i  $(dp/dt)_{max}$  od koncentracji nominalnej pyłu. *Metoda korekcji* pozwala porównywać wyniki oznaczeń dynamiki wybuchu pyłu  $((dp/dt)_{max})$  uzyskane w warunkach różnej turbulencji. Ma praktyczne znaczenie w przypadku takich pyłów, których badanie w standardowej aparaturze stwarza poważne trudności z powodu niemożliwości zastosowania typowej metody dyspersji. Metoda może też posłużyć do zmniejszenia rozrzutu punktów doświadczalnych uzyskanych w standardowych oznaczeniach szybkości narastania ciśnienia wybuchu.

Metoda statystyczna polega na dopasowaniu parametrów funkcji do zależności parametrów wybuchowości od koncentracji nominalnej  $C_n$ . Jako funkcje dopasowywane wybrano:

$$p(C_n) = \sum_{i=0}^4 a_i (\ln C_n)^i$$

i

$$\frac{dp}{dt}(C_n) = \sum_{i=0}^4 b_i (\ln C_n)^i$$

Parametry  $a_i$  i  $b_i$  są dopasowywane z użyciem nieliniowej metody najmniejszych kwadratów. Obliczenie wartości tych parametrów pozwala wyznaczyć estymatory  $\hat{p}_{max}$  i  $\left(\frac{dp}{dt}\right)_{max}$  rzeczywistych wartości  $p_{max}$  i  $\left(\frac{dp}{dt}\right)_{max}$  jako wartości maksymalne funkcji  $p(C_n)$  i  $\frac{dp}{dt}(C_n)$ . Następnie stosuje się metodę *jackknife* do wyznaczenia wariancji wyznaczonych estymatorów. Estymator *jackknife* oblicza zestaw  $n$  pseudoestymatorów przez usunięcie jednego punktu doświadczalnego i powtórzenie estymacji dla  $n-1$  punktów. Jeżeli  $p_{-i}$  i  $\left(\frac{dp}{dt}\right)_{-i}$  oznaczają estymatory uzyskane w wyniku usunięcia  $i$ -tego punktu doświadczalnego, to

$$\bar{p}_{-} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_{-i}$$

i

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{-} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{dp}{dt}\right)_{-i}$$

są wartościami średnimi pseudoestymatorów. Estymatorami Quenouille-Tukey Jackknife dla  $p_{max}$  i  $\left(\frac{dp}{dt}\right)_{max}$  są

$$\tilde{p}_{max} = n\hat{p}_{max} - (n-1)\bar{p}_{-}$$

i

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{max} = n\left(\frac{dp}{dt}\right)_{max} - (n-1)\left(\frac{dp}{dt}\right)_{-}$$

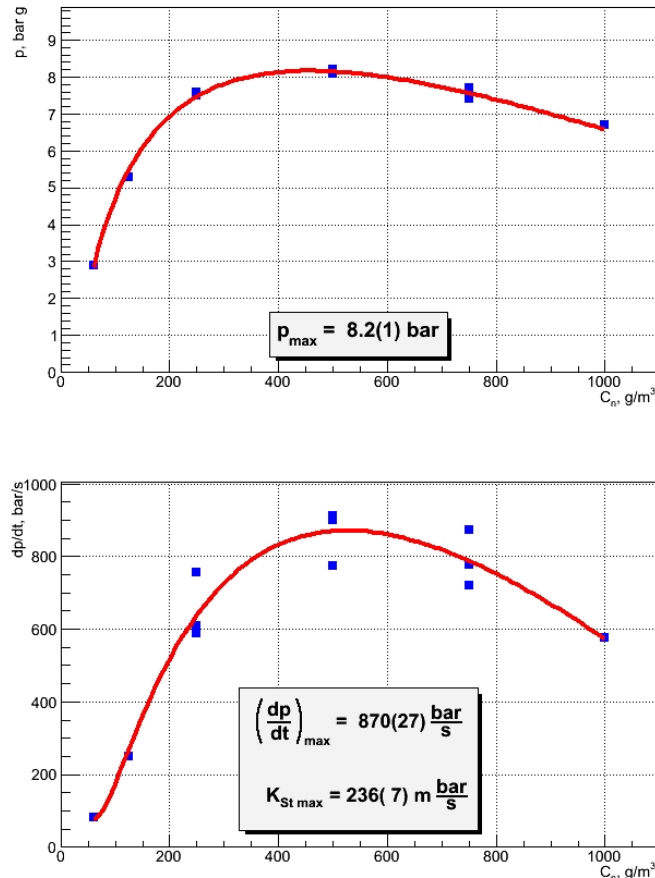
natomiast ich wariancję oblicza się w sposób następujący

$$\sigma^2(\tilde{p}_{max}) = \frac{n-1}{n} \sum_{i=1}^n (p_{-i} - \bar{p}_{-})^2$$

$$\sigma^2\left(\left(\frac{dp}{dt}\right)_{max}\right) = \frac{n-1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{dp}{dt}\right)_{-i} - \left(\frac{dp}{dt}\right)_{-}\right)^2$$

Rys. 3 przedstawia przykład zastosowania tej metody.





Rys. 3. Przykład zastosowania metody statystycznej do wyznaczenia parametrów wybuchowości pyłu Niacyny

Metoda korekcji polega na „przesuwaniu” czasu do punktu, w którym intensywność turbulencji (zdefiniowana średniokwadratową szybkością pulsacyjną  $u'_{rms}$  i charakterystyczną skalą długości turbulencji  $l_t$ ) jest taka, jak podczas badania w standardowej komorze  $1 \text{ m}^3$  (Rys. 1d). W metodzie wykorzystuje się relację między turbulentną ( $S_T$ ) i laminarną ( $S_L$ ) szybkością spalania zaproponowaną przez Brey'a:

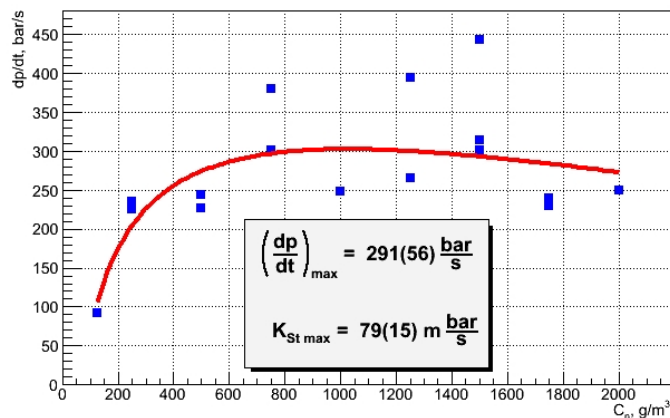
$$S_T = 15.1 S_L^{0.784} u'_{rms}{}^{0.412} l_t^{0.196}$$

Korektę wprowadza się w sposób następujący:

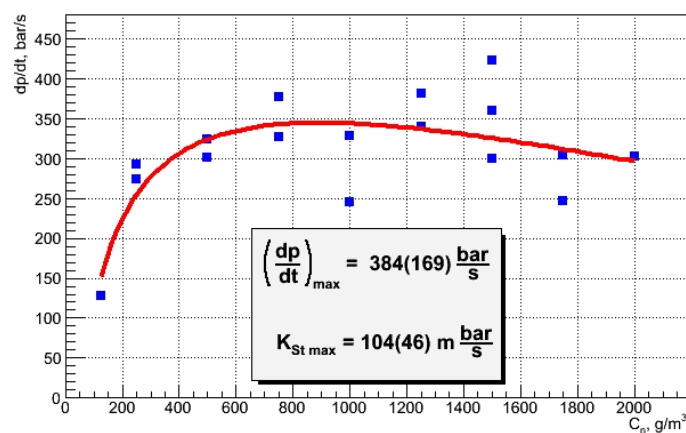
$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{max}^{1m^3} = \left(\frac{dp}{dt}\right)_{max}^{20-l} \frac{S_T(t_{1m})}{S_T(t_{max})} = \left(\frac{dp}{dt}\right)_{max}^{20-l} \left[ \frac{u'_{rms}(t_{1m})}{u'_{rms}(t_{max})} \right]^{0.412} \left[ \frac{l_t(t_{1m})}{l_t(t_{max})} \right]^{0.196}$$

gdzie  $t_{max}$  jest czasem, w którym szybkość narastania ciśnienia osiąga maksymalną wartość.

Rys. 4 przedstawia przykład zastosowania metody korekcji do zmniejszenia rozrzutu punktów doświadczalnych spowodowanego różnymi czasami  $t_{max}$  w kolejnych testach.



a) przed korektą



b) po korekcie

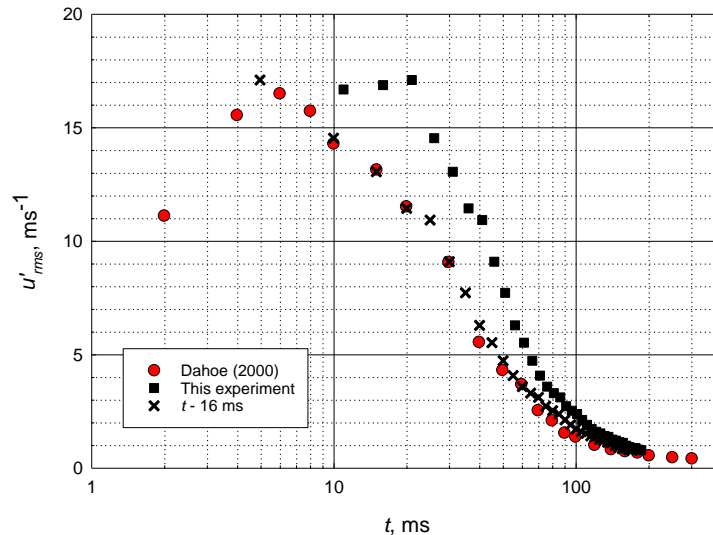
Rys. 4. Przykład zastosowania metody korekcji do wyników doświadczalnych dla pyłu węglowego

**Publikacja 7:** Dyduch Z., Toman A., Adamus W.: *Measurements of turbulence intensity in the standard 1 m<sup>3</sup> vessel*, *Loss Prev. Proc. Ind.*, **40**, 2016, 180-187

Publikacja przedstawia wyniki pomiarów intensywności turbulencji w komorze badawczej o objętości 1 m<sup>3</sup> zbudowanej i stosowanej w Kopalni Doświadczalnej *Barbara* Głównego Instytutu Górnictwa. Komora spełnia wszystkie wymagania stawiane przez normy europejskie serii PN-EN 14034, normę amerykańską ASTM E1226-12a i międzynarodową normę ISO 6184/1. Za pomocą głowicy *Bi-Directional Velocity Probe BDVP* wykonano pomiary składowych chwilowej prędkości przepływu w przestrzeni wewnętrznej komory wytworzonego przez podmuch powietrza z układu dyspersji pyłu. Prędkość przepływu została zmierzona w wielu punktach, w każdym z punktów w dwóch prostopadłych kierunkach. Z pomiarów tych wyodrębniono składową pulsacyjną i wyznaczono jej średniokwadratową wartość  $u'_{rms}$  oraz charakterystyczną skalę długości turbulencji  $l_T$ .

Przed zasadniczymi pomiarami dokonano sprawdzenia poprawności działania głowicy BDVP. Wykonano pomiary  $u'_{rms}$  w standardowej komorze sferycznej 20-l, ponieważ w literaturze są dostępne dokładne wyniki pomiarów tej wielkości wykonane za pomocą dwuwymiarowej anemometrii Dopplerowskiej.

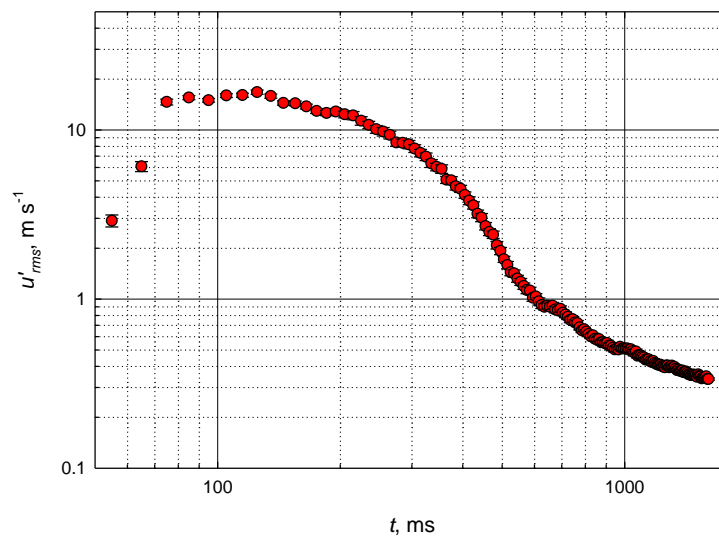




Rys. 5. Sprawdzenie poprawności działania głowicy BDVP

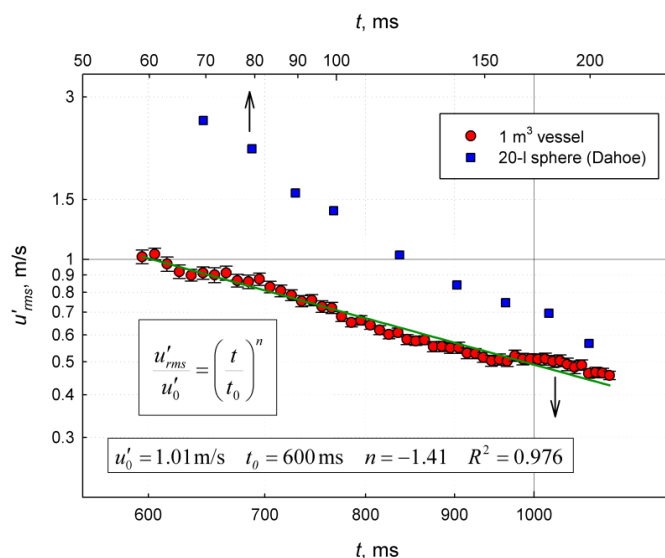
Wyniki sprawdzenia przedstawiają wykresy na Rys. 5. Uzyskane wyniki są porównywalne z wynikami odniesienia (Dahoe 2000), jednak wysoki poziom turbulencji trwa dłużej. Po tym czasie rozpad turbulencji jest bardzo podobny. Można to pokazać przesuwając uzyskane wyniki wstecz w czasie. Przesunięcie o 16 ms ujawnia doskonałą zgodność obu zestawów punktów doświadczalnych.

W komorze  $1 \text{ m}^3$  zmierzono łącznie 12 składowych prędkości przepływu. Pomiar każdej składowej powtórzono co najmniej 10-krotnie. Mierzono intensywność turbulencji wywołanej zadziałaniem zarówno jednego, jak i dwóch układów dyspersyjnych. We wszystkich przypadkach uzyskano taki sam kształt zależności  $u'_{rms}(t)$  i tylko nieznaczne różnice wartości  $u'_{rms}$  w obszarze, gdzie turbulencja była najsilniejsza. Od momentu  $t > 600 \text{ ms}$  wszystkie zmierzone przebiegi zmian turbulencji były praktycznie identyczne. Zaskakującym wynikiem był brak różnic w zależności  $u'_{rms}(t)$  w przypadku użycia jednego i dwóch układów dyspersyjnych. Uzyskane wyniki pozwalają stwierdzić, że poczynając od czasu 600 ms po rozpoczęciu dyspersji pyłu turbulencja w standardowej komorze  $1 \text{ m}^3$  jest jednorodna i izotropowa.

Rys. 6. Zmiany średniokwadratowej prędkości pulsacyjnej w standardowej komorze  $1 \text{ m}^3$

Rys. 6 przedstawia podsumowanie opisanych pomiarów. Każdy punkt na wykresie jest średnią po wszystkich pomiarach wykonanych w określonym momencie. Rozmiary niepewności pomiarowych potwierdzają podobieństwo zmian turbulencji we wszystkich wykonanych pomiarach.

Prowadząc badania wybuchowości pyłów w komorze  $1\text{ m}^3$  najważniejszy jest przedział czasu między 600 ms i 1000 ms od momentu rozpoczęcia dyspersji pyłu. W tym czasie następuje rozwój wybuchu. Na Rys. 7 przedstawiono tę część wykresu z Rys. 6. Zamieszczono też wyniki pomiarów  $u'_{rms}$  w standardowej sferze 20-l w przedziale czasu charakterystycznym dla tej aparatury.



Rys. 7. Porównanie średniokwadratowej prędkości pulsacyjnej w standardowej komorze  $1\text{ m}^3$  i sferze 20-l w przedziale czasu charakterystycznym dla obu komór

W przedziałach czasu charakterystycznych dla obu komór wartości  $u'_{rms}$  w sferze 20-l są większe. Co więcej, rozpad turbulencji w sferze zachodzi szybciej. Zazwyczaj maksymalna szybkość narastania ciśnienia wybuchu w sferze 20-l jest osiągnięta w pobliżu 90 ms;  $u'_{rms}$  ma wtedy wartość 1,5 m/s. W komorze  $1\text{ m}^3$  maksymalna szybkość narastania ciśnienia ma zwykle miejsce w przedziale czasu pomiędzy 700 ms i 800 ms. W tym czasie  $u'_{rms}$  zmienia się od 0,8 m/s do 0,7 m/s. Ta różnica decyduje o stwierdzonej rozbieżności oznaczeń  $(dp/dt)_{max}$  w obu komorach.

Otrzymany wynik stoi w sprzeczności z klasycznymi badaniami W. Bartknechta i R. Siwka, którzy wykazali zgodność między wynikami uzyskiwanymi w dwóch typach standardowej aparatury. Ich wyniki stanowią podstawę akceptacji sfery 20-l jako aparatury służącej do oznaczania parametrów wybuchowości pyłów. Wyjaśnienie tej sprzeczności tkwi w nieprecyzyjnym opisie budowy standardowej komory  $1\text{ m}^3$ . Częścią aparatury, która niewątpliwie wymaga lepszego opisu jest układ dyspersji pyłu. Przeprowadzona w pracy szczegółowa analiza poszczególnych części tego układu pozwoliła wskazać szybko działający zawór jako element decydujący o turbulencji wywołanej dyspersją pyłu. Najważniejszym uzupełnieniem opisu budowy standardowej komory  $1\text{ m}^3$  powinien być dokładny opis tego zaworu.

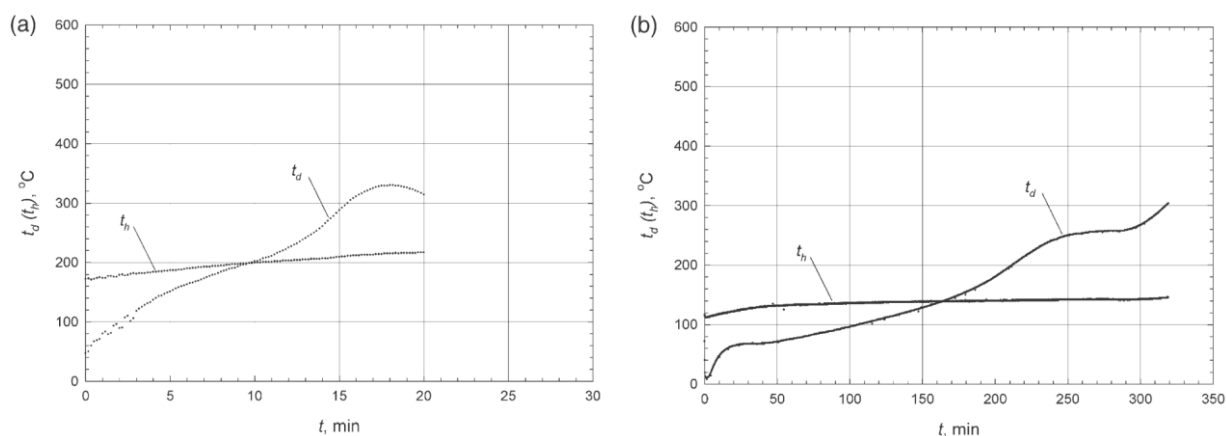
#### MINIMALNA TEMPERATURA ZAPŁONU WARSTWY PYŁU

**Publikacja 1:** Lebecki K., Dyduch Z., Fibich A., Śliż J.: *Ignition of a dust layer by a constant heat flux*, J. Loss Prev. Proc. Ind., **16**, No. 4, 2003

Celem pracy było oszacowanie różnic między minimalną temperaturą zapłonu warstwy pyłu oznaczoną standardową metodą, utrzymując stałą temperaturę płyty grzejnej (metoda CTHP) i tym samym parametrem oznaczonym z zachowaniem stałej szybkości wydzielania ciepła (metoda CRHG). Warunki badania CRHG

uzyskiwano łącząc element grzejny płyty bezpośrednio ze źródłem zasilania o stałym napięciu. Założono przy tym, że wzrost temperatury płyty grzejnej nie powoduje znaczących zmian parametrów elementu grzejnego. Badania wykonano dla dwóch pyłów węglowych: pyłu *Barbara d40* (brb) traktowanego jako pył odniesienia i pyłu węgla pochodzącego z kopalni *Zofiówka* (zfk). Pyły różniły się zawartością części lotnych i popiołu. Dodatkowo, pył zfk zawierał więcej frakcji o dużym rozdrobnieniu. Pozostałe parametry pyłów były podobne. Zastosowanie metody CRHG wymagało modyfikacji jednego z kryteriów zapłonu pyłu. W standardowej metodzie CTHP przyjmuje się, że nastąpił zapłon, jeżeli temperatura w warstwie pyłu przekracza o co najmniej 250 K temperaturę płyty grzejnej. W metodzie CRHG temperatura ta zmienia się podczas prowadzenia pomiarów. W tej sytuacji kontrolując różnicę temperatur pyłu i płyty grzejnej brano pod uwagę chwilową temperaturę tej ostatniej. Tym niemniej uzyskany wynik odnoszono do temperatury początkowej płyty, w momencie formowania na niej warstwy pyłu.

Rys. 8 przedstawia typowe zmiany temperatury pyłu  $t_d$  i płyty grzejnej  $t_h$  podczas badania metodą CRHG warstw o grubości  $d = 5$  mm i  $d = 50$  mm. W obu przypadkach pył uległ zapaleniu, jednak różne były skale czasowe zjawiska. Cienka warstwa pyłu zapaliła się po ok. 14 min, natomiast zapłon w warstwie grubej nastąpił po ponad 3 h. W obu przypadkach widoczny jest wzrost temperatury płyty grzejnej. Wzrost ten nie przekracza 50 K. W przypadku warstwy pyłu o dużej grubości temperatura płyty grzejnej wzrastała w ciągu pierwszych 50 min, po czym nastąpiła jej stabilizacja. Zapłon pyłu w cienkiej warstwie nastąpił dużo wcześniej nim ustabilizowała się temperatura płyty grzejnej.

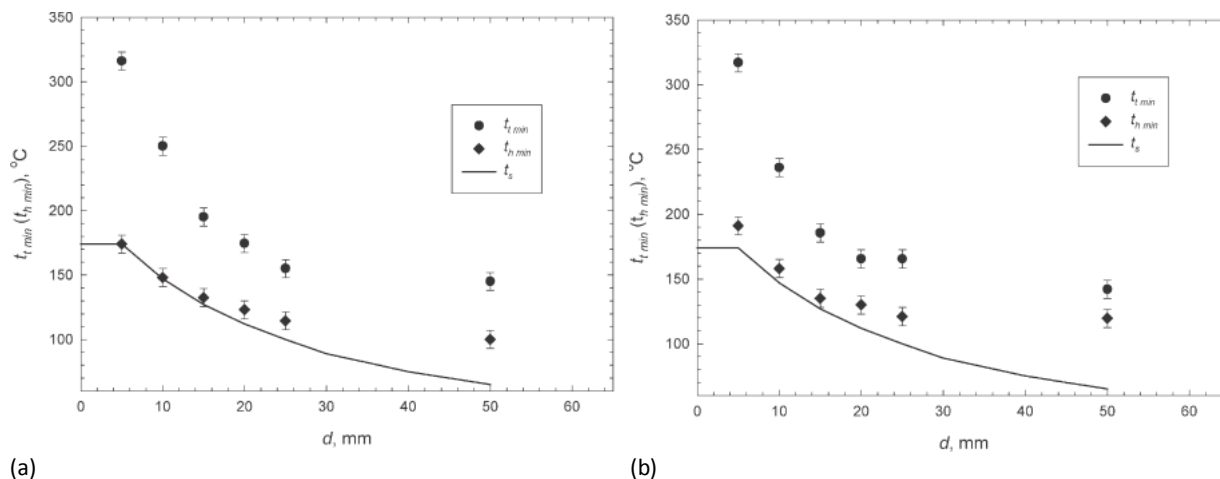


Rys. 8. Zmiany temperatury pyłu  $t_d$  i płyty grzejnej  $t_h$  podczas badania warstw o różnych grubościach metodą CRHG (a)  $d = 5$  mm, (b)  $d = 50$  mm

Dla obu pyłów, oboma metodami wykonano oznaczenia minimalnej temperatury zapłonu warstwy pyłu dla warstw o grubości 5 mm, 10 mm, 20 mm, 25 mm i 50 mm. Wykresy na Rys. 9 stanowią podsumowanie przeprowadzonych badań. Kształt wszystkich przedstawionych zależności jest jakościowo podobny. W miarę wzrostu grubości warstwy pyłu oznaczone temperatury obniżają się. Początkowo spadek temperatury jest bardzo szybki, później, dla grubych warstw staje się bardzo mały. W przypadku pyłu zfk różnica oznaczonych temperatur zapłonu dla warstw o grubości 25 mm i 50 mm jest równa zaledwie 2 K. Jest to wartość mniejsza od dokładności wykonanych pomiarów. Różnica między wynikami uzyskanymi metodą CTHP i CRHG jest wyraźna. Wszystkie temperatury oznaczone pierwszą z metod są wyższe od odpowiednich temperatur oznaczonych metodą drugą. Nieoczekiwanie, różnice te są największe w przypadku warstw o małej grubości. Sięgają 140 K w przypadku pyłu brb i 120 K dla pyłu zfk. Przyczynę takiego zachowania można wyjaśnić następująco. Zapłon w warstwie pyłu następuje w pewnej odległości od płyty grzejnej. W tym miejscu ciepło wydzielane w reakcji chemicznej powoduje lokalny wzrost temperatury i przepływ ciepła w kierunku obu powierzchni warstwy, górnej i dolnej. W metodzie CRHG stały strumień ciepła doprowadzany przez płytę grzejną do dolnej powierzchni warstwy pyłu utrudnia przekazywanie ciepła reakcji chemicznej w tym kierunku. Inna sytuacja ma miejsce w metodzie CTHP. W pewnym momencie płyta grzejna zaczyna być odbiornikiem ciepła, ponieważ jej

temperatura staje się niższa od temperatury umieszczonego na niej pyłu. To powoduje obniżenie temperatury w miejscu, gdzie biegnie reakcja chemiczna i w rezultacie zwolnienie reakcji. Wpływ tego zjawiska na przebieg reakcji chemicznej w pyłe jest tym większy im mniejsza jest odległość między miejscem reakcji i płytą grzejną. Zatem wpływ ten jest największy w przypadku warstw pyłu o małej grubości.

W miarę zwiększania grubości różnice stają się coraz mniejsze. Wydaje się, że dla warstw o dużej grubości różnice te ustalają się na poziomie 30 K-50 K, co odpowiada wzrostowi temperatury płyty grzejnej w oznaczeniach metodą CRHG (Rys. 8b).



Rys. 9. Minimalne temperatury zapłonu warstwy pyłu w funkcji grubości warstwy oznaczone metodami CTHP ( $t_{t,min}$ ) i CRHG ( $t_{h,min}$ ). (a) pył Barbara d40, (b) pył Zofiówka

Na wykresach zamieszczonych na Rys. 9 zaznaczono też linie (oznaczone  $t_s$ ) reprezentujące maksymalne dopuszczalne temperatury powierzchni, na których tworzą się warstwy pyłu. Są to diagramy zamieszczone w normie europejskiej PN-EN 60079-14 odpowiadające temperaturom  $T_{5,mm}$  w przedziale 250°C – 320°C. W tym przedziale, w pobliżu jego górnej granicy, mieszczą się temperatury  $T_{5,mm}$  oznaczone dla pyłów brb i zfk. W obszarze cienkich warstw linie diagramów będą bardzo blisko minimalnych temperatur oznaczonych metodą CRHG, w miarę jednak przesuwania się w kierunku warstw o większej grubości norma rekomenduje wyraźnie niższe wartości maksymalnych dopuszczalnych temperatur powierzchni, niż temperatury oznaczone metodą CRHG. Należy jednak zwrócić uwagę, że temperatury  $T_{5,mm}$  pyłów brb i zfk leżą blisko górnej granicy przedziału stosowności tego diagramu. Jest bardzo prawdopodobne, że w przypadku pyłów, których temperatura leży blisko dolnej granicy tego przedziału temperatury zapłonu warstwy oznaczone metodą CRHG będą znacznie niższe od rekomendacji wynikających z diagramów.

Zaprezentowane wyniki wskazują trudności w poprawnym odnoszeniu wyników oznaczenia minimalnej temperatury zapłonu warstwy pyłu  $T_{5,mm}$  do rzeczywistych warunków przemysłowych. Wykazują, że w niektórych przypadkach oszacowanie najwyższej dopuszczalnej temperatury powierzchni, na których może osiadać pył na podstawie wartości  $T_{5,mm}$  i dodatkowego marginesu bezpieczeństwa zalecanego w normach może prowadzić do zbyt wysokiego wyniku. Nawet w przypadku warstw pyłu o niewielkiej grubości margines bezpieczeństwa zdefiniowany w normach europejskich może okazać się niewystarczający.

**Publikacja 2:** Dyduch Z., Majcher B.: *Ignition of a dust layer by a constant heat flux-heat transport in the layer*, J. Loss Prev. Proc. Ind., **19**, No. 2-3, 2006

Badania opisane w tej publikacji stanowią kontynuację prac, których dotyczyła publikacja poprzednia. Aby lepiej zrozumieć zjawiska zachodzące podczas oznaczania minimalnej temperatury zapłonu warstwy pyłu, przygotowano jednowymiarowy model opisujący początkową fazę zapłonu warstwy pyłu na poziomej powierzchni o podwyższonej temperaturze. Przewidywania modelu zostały następnie porównane z wynikami oznaczeń uzyskanymi metodą stałego strumienia ciepła CRHG.

Zmienne w czasie pole temperatury w warstwie pyłu opisuje równanie Fouriera:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot \lambda \nabla T + q$$

gdzie

- $\rho$  – gęstość nasypowa pyłu
- $c$  – jego ciepło właściwe
- $T$  – temperatura
- $t$  – czas
- $\lambda$  – współczynnik przewodnictwa cieplnego
- $q$  – szybkość wydzielania ciepła

Przyjmując, że w początkowej fazie zapłonu reakcja spalania nie jest kontrolowana przez transport tlenu w warstwie pyłu, a spalanie paliwa nie jest zbyt szybkie szybkość wydzielania ciepła można opisać relacją typu Arrheniusa w postaci

$$q = Q\rho \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

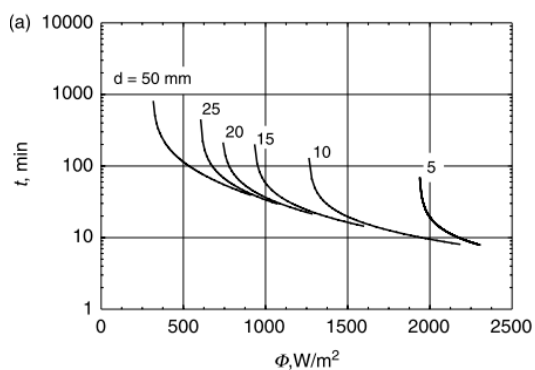
gdzie

- $Q$  – ciepło spalania
- $A$  - współczynnik przedeksponencjalny
- $E$  – energia aktywacji
- $R$  – uniwersalna stała gazowa

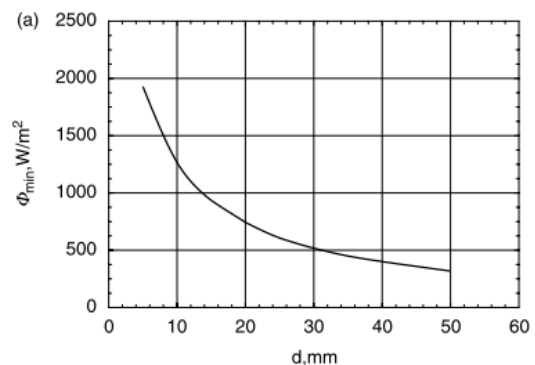
Zakładając dodatkowo, że transport ciepła odbywa się tylko w kierunku pionowym i że w rozpatrywanym zakresie temperatur współczynnik przewodnictwa cieplnego nie zależy od temperatury, z powyższych równań wynika jednowymiarowe równanie modelu:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{QA}{c} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

Wszystkie parametry modelu opisujące właściwości pyłu, szybkość wydzielania i przewodzenia ciepła oraz warunki brzegowe zostały wyznaczone doświadczalnie.



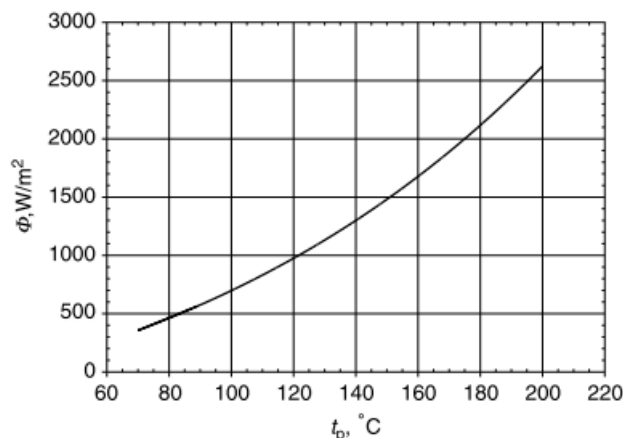
Rys. 10. Czas indukcji zapłonu w funkcji strumienia ciepła



Rys. 11. Zależność krytycznego strumienia ciepła od grubości warstwy pyłu

Wykresy na Rys. 10 stanowią podsumowanie wyników symulacji dla jednego z pyłów (brb). Każda z linii reprezentuje zależność czasu indukcji zapalenia od strumienia ciepła przekazywanego warstwie pyłu przez płytę grzejną. Korzystając z tych zależności dla każdej grubości warstwy można wyznaczyć krytyczny strumień ciepła  $\Phi_{min}$  odpowiadający temperaturze płyty grzejnej bez pyłu. Jest to minimalna temperatura zapłonu warstwy pyłu

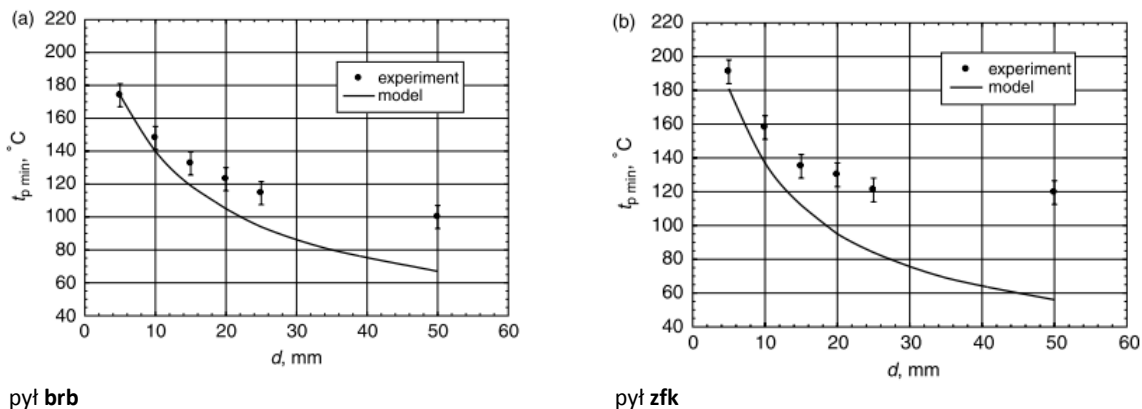
oznaczona metodą CRHG.  $\Phi_{min}$  jest wartością asymptotyczną strumienia ciepła, który odpowiada czasowi indukcji zapłonu dążącemu do nieskończoności. Tak wyznaczony krytyczny strumień ciepła w funkcji grubości warstwy przedstawia wykres na Rys. 11. Wykres ten niesie te same informacje co zwykle przedstawiane w literaturze zależności minimalnej temperatury zapłonu warstwy pyłu od grubości warstwy.



Rys. 12. Zależność strumienia ciepła  $\Phi$  od temperatury płyty grzejnej  $t_p$

Aby zależność zamieszczoną na Rys. 11 przedstawić w formie użytecznej praktycznie, konieczna jest relacja między strumieniem ciepła oddawanym z płyty grzejnej  $\Phi$  i temperaturą płyty  $t_p$ . Taką relację (Rys. 12) wyznaczono poprzez pomiary całkowitego strumienia ciepła z płyty grzejnej. Należy podkreślić, że relacja ta nie ma charakteru uniwersalnego. Odzwierciedla ona specyficzne cechy aparatury pomiarowej użytej w części doświadczalnej badań.

Relacja przedstawiona na Rys. 12 pozwoliła na bezpośrednie porównanie wyników symulacji z danymi doświadczalnymi. Porównanie to, dla obu badanych pyłów, przedstawiono na Rys. 13.



Rys. 13. Minimalna temperatura zapłonu warstwy pyłu w funkcji grubości warstwy. Porównanie przewidywań modelu z wynikami doświadczalnymi

Zgodność przewidywań modelu jest dobra w obszarze cienkich warstw pyłu. Przewiduje jednak znacznie szybszy spadek  $t_p$  ze wzrostem grubości warstwy niż zmierzony doświadczalnie. W rezultacie, w przypadku warstw o grubości 50 mm różnica między wynikami doświadczalnymi i modelem dla pyłów **brb** i **zfk** wynosi odpowiednio 30 K i 60 K.

Jednowymiarowy model zjawiska zakłada transport ciepła w jednym kierunku, w wybranej konfiguracji pionowo, od płyty grzejnej w kierunku górnej powierzchni warstwy pyłu. W kierunku poziomym model przyjmuje nieskończony rozmiar warstwy. W praktyce założenie to oznacza, że rozmiar warstwy pyłu  $D$  w kierunku poziomym jest duży w porównaniu z jej grubością  $d$ . Przy takim założeniu można pominąć transport

ciepła w warstwie w kierunku poziomym. Z tego powodu można oczekiwać zgodności przewidywań modelu z danymi doświadczalnymi tylko wtedy, gdy konfiguracja aparatury pomiarowej spełnia powyższe założenie. Normy definiujące sposób oznaczania  $T_{5mm}$  zalecają badanie warstwy kołowej o średnicy  $D = 100$  mm. Takie też warstwy były wykorzystywane w doświadczalnej części pracy. Dla warstwy o grubości  $d = 5$  mm stosunek  $D/d = 20$ . Jest to wartość wystarczająca, aby założenia modelu były spełnione. Jednak w przypadku warstwy o grubości  $d = 50$  mm stosunek  $D/d = 2$ . W tym przypadku transport ciepła w kierunku poziomym powinien już odgrywać znaczącą rolę.

W praktyce raczej rzadko zdarzają się sytuacje, kiedy warstwy pyłu osiadłego na urządzeniach mają grubość porównywalną z ich rozmiarami poziomymi. W związku z tym wydaje się, że w przypadku warstw o znacznej grubości to jednowymiarowy model zjawiska jest bliższy praktyce przemysłowej. Standardowa aparatura pomiarowa służąca do oznaczania minimalnej temperatury zapłonu warstwy pyłu zawyża wartość tego parametru w przypadku warstw o dużej grubości. W konsekwencji wyznaczona zgodnie z normami maksymalna dopuszczalna temperatura powierzchni urządzeń może okazać się zbyt wysoka.

#### POMIAR LAMINARNEJ SZYBKOŚCI SPALANIA W MIESZANINACH PYŁOWO-POWIETRZNYCH

**Publikacja 3:** Dyduch Z., Majcher-Morawiec B.: *Oznaczanie prędkości spalania w mieszaninach pyłowo-powietrznych z wykorzystaniem modelu wybuchu w zamkniętej objętości*, Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko, **2**, 2007

W pracy przedstawiono wyniki oznaczania laminarnej szybkości spalania deflagacyjnego w mieszaninach pyłowo-powietrznych za pomocą metody pozwalającej na rutynowe wykonywanie tego typu oznaczeń. Po raz pierwszy metoda ta została zastosowana przez A. Dahoe. Polega ona na wykorzystaniu pomiarów zmian ciśnienia w czasie wybuchu mieszaniny pyłowo-powietrznej w zamkniętej, sferycznej objętości oraz modelu wybuchu opartego na zasadach zachowania w ujęciu całkowym. Dopasowanie parametrów modelu do zmierzonych zmian ciśnienia pozwala wyznaczyć laminarną szybkość spalania w mieszaninie pyłowo-powietrznej. W pracy przedstawiono wyniki oznaczeń laminarnych szybkości spalania dwóch pyłów: lycopodium i skrobi kukurydzianej. Powszechnie znane właściwości pyłu lycopodium sprawiają, że stał się on swego rodzaju pyłem odniesienia. W literaturze można też znaleźć informacje na temat laminarnej szybkości spalania pyłu skrobi kukurydzianej.

Przeprowadzono serię doświadczeń w standardowej sferze 20-l. W rezultacie otrzymano dwa zestawy wyników: dla skrobi kukurydzianej i zarodników lycopodium. Dla obu pyłów wybuchy przeprowadzono w szerokim zakresie koncentracji nominalnych.

Rodzaj i energia źródła zapłonu wpływa nie tylko na inicjację wybuchu pyłu, ale również na następujący po niej rozwój wybuchu. Jednym z podstawowych założeń modelu jest punktowość źródła zapłonu i jego zaniedbywalnie mała energia, która nie wpływa bezpośrednio na przebieg wybuchu. Szybkość spalania jest szacowana przy założeniu uproszczonej, sferycznej propagacji płomienia od umieszczonego centralnie źródła zapłonu w kierunku ścian komory doświadczalnej. Źródło zapłonu wykorzystywane do tego typu badań powinno dostarczać odpowiednią ilość energii, ale jednocześnie jej uwolnienie nie powinno wprowadzać znacznych zakłóceń we wczesnej fazie propagacji płomienia wybuchu. Aby sprostać tym wymaganiom do inicjowania wybuchów w sferze 20-l użyto wyładowania iskrowego o energii 6 J.

Zasadniczym równaniem modelu jest relacja między szybkością narastania ciśnienia wybuchu i wielkościami opisującymi jego przebieg: maksymalnym ciśnieniem wybuchu  $P_e$ , chwilowym ciśnieniem  $P$ , położenie frontu i końca płomienia  $r_{front}$  i  $r_{rear}$ , grubością płomienia  $\delta$  oraz turbulentną szybkością spalania  $S_u$ . Pozostałe wielkości w tej relacji to objętość sfery  $V$  i ciśnienie początkowe  $P_o$ . Omawiana relacja ma postać:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{P_e - P_o}{V} \left(\frac{P}{P_o}\right)^{\frac{1}{\gamma}} 4\pi S_u \frac{r_{front}^3 - r_{rear}^3}{3\delta}$$

Model uzupełniają relacje pozwalające obliczać położenie płomienia ( $r_{front}$ ,  $r_{rear}$ ,  $\delta$ ) w czasie rozwoju wybuchu i zależność szybkości spalania od temperatury i ciśnienia.



Szybkość spalania  $S_u$  w powyższej relacji jest oczywiście turbulentną szybkością spalania. Aby wyznaczyć poszukiwaną laminarną szybkość spalania w mieszaninie pył-powietrze należy wybrać zależność między turbulentną szybkością spalania i laminarną szybkością spalania oraz parametrami opisującymi turbulencję. W ramach pracy wykonano obliczenia stosując dwie tego typu relacje. Pierwszą z nich była relacja zaproponowana przez K.N.C. Braya

$$S_u = 15.1 S_L^{0.784} u'_{rms}{}^{0.412} l_f^{0.196}$$

Relacja ta jest często stosowana w przypadku mieszanin gaz-powietrze, natomiast jej poprawność w przypadku mieszanin pył-powietrze nie jest dobrze potwierdzona. Dlatego przeprowadzono też obliczenia z wykorzystaniem innych relacji, wprowadzonych przez A. Dahoe. Posługując się metodami analizy wymiarowej wyprowadził on relacje wiążące zarówno laminarną i turbulentną szybkość spalania, jak i podobną relację dla grubości laminarnej  $\delta_L$  i turbulentnej  $\delta_T$  płomienia:

$$\frac{S_u}{S_L} = 1 + \text{Da}^{\alpha'} \left( \frac{u'_{rms}}{S_L} \right)^{b'}$$

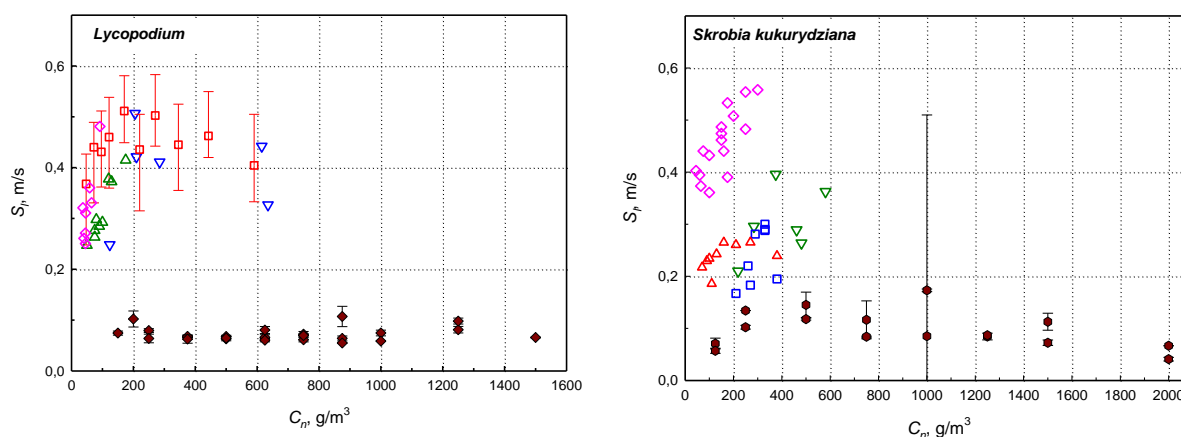
$$\frac{\delta_T}{\delta_L} = 1 + \text{Da}^{\alpha''} \left( \frac{l_f}{\delta_L} \right)^{b''}$$

W powyższych równaniach symbol **Da** oznacza liczbę Damköhlere zdefiniowaną jako

$$\text{Da} = \frac{l_t}{\frac{u'_{rms}}{S_L}}$$

Parametry turbulencji były obliczane za pomocą dostępnych w literaturze relacji empirycznych.

Wykresy zamieszczone na Rys. 14 przedstawiają wyniki uzyskane z zastosowaniem relacji Braya. Zaznaczono na nich także dostępne w literaturze wartości laminarnej szybkości spalania uzyskane tradycyjnymi metodami pomiarowymi.



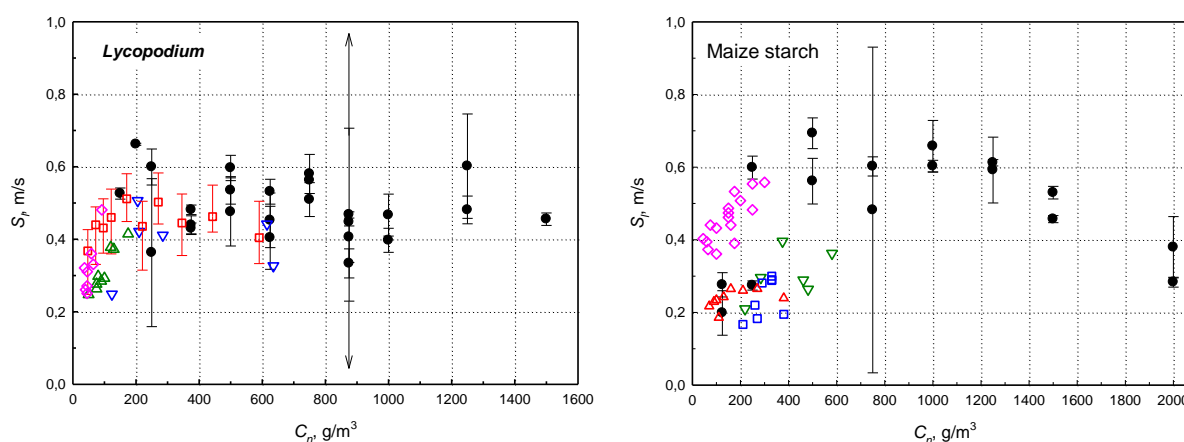
Rys. 14. Laminarna szybkość spalania w funkcji koncentracji pyłu wyznaczona za pomocą relacji Braya.

Wartości laminarnej szybkości spalania przedstawione na Rys. 14 są znacznie mniejsze od wyników uzyskanych w innych eksperymentach dla pyłów Lycopodium i skrobi kukurydzianej. W przypadku Lycopodium, ze wzrastającą koncentracją nominalną pyłu wartości otrzymane w innych eksperymentach wykazują wzrost laminarnej szybkości spalania, która osiąga 0,5 m/s przy koncentracji ok. 200 g/m<sup>3</sup>. Przy wyższych koncentracjach zaznacza się słaby spadek  $S_L$ . Wyniki uzyskane w ramach obecnej pracy wykazują praktycznie



brak zależności  $S_L$  od koncentracji nominalnej pyłu. W szerokim zakresie koncentracji wartości laminarnej szybkości spalania utrzymują się na poziomie 0,06 - 0,1 m/s, tzn. są ponad pięciokrotnie niższe od odpowiednich wartości uzyskanych w innych eksperymentach. W przypadku skrobi kukurydzianej rozbieżność między wynikami uzyskanymi w ramach obecnej pracy i danymi zaczerpniętymi z literatury jest mniejsza. W tym przypadku gorsza jest z kolei zgodność między wynikami uzyskanymi przez poszczególnych autorów. Wartości  $S_L$  uzyskane w ramach obecnej pracy wykazują typową zależność od koncentracji nominalnej pyłu z maksimum przy koncentracji ok. 500 g/m<sup>3</sup>. Podsumowując przedstawione wyniki można stwierdzić, że zastosowana metoda prowadzi do błędnego oszacowania laminarnej szybkości spalania.

W kolejnej próbie przyjęto, że zarówno laminarna szybkość spalania jak i grubość płomienia zależą od temperatury i ciśnienia. Relację Braya zastąpiono relacjami Dahoe. Uzyskane w ten sposób wyniki przedstawiają wykresy zamieszczone na Rys. 15.



Rys. 15. Laminarna szybkość spalania w funkcji koncentracji pyłu wyznaczona za pomocą relacji Dahoe

W przypadku obu pyłów wyznaczone wartości laminarnej szybkości spalania są bliższe wartości spodziewanych. Potwierdza to dobra zgodność z wynikami eksperymentów cytowanych w literaturze, w których stosowano inne metody pomiaru. Zwracają uwagę nieco większe niepewności pomiarów w porównaniu z wynikami otrzymanymi przy zastosowaniu poprzedniej wersji modelu. Wiąże się to ze znacznie większą liczbą parametrów dopasowywanych w tej jego wersji. Zaskakującym wynikiem są wartości  $S_L$  uzyskane dla skrobi. W żadnym z opisanych w literaturze eksperymentów nie uzyskiwano wartości wyższych niż 0,6 m/s. Rozstrzygnięcie, czy tak wysokie wartości są wynikiem nieprawidłowych założeń przyjętych w modelu, czy też rzeczywiście jest to cecha mieszanin pyłu skrobi kukurydzianej z powietrzem wymaga przeprowadzenia dalszych badań.

Przedstawione wyniki pokazały wyraźnie jak ważną rolę w całej procedurze wyznaczania laminarnej szybkości spalania odgrywa poprawna relacja wiążąca turbulentną szybkość spalania z laminarną szybkością i parametrami definiującymi turbulencję. Zła relacja praktycznie wyklucza możliwość poprawnego oszacowania poszukiwanych parametrów.

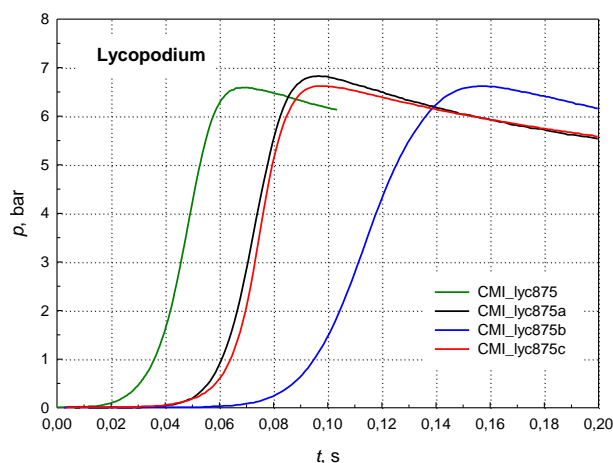
**Publikacja 4:** Dyduch Z.: *Szacowanie laminarnej szybkości spalania mieszanin pył-powietrze na podstawie pomiarów ciśnienia w komorze sferycznej*, Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko, **4**, 2009

W pracy opisano szczegóły numeryczne związane z implementacją procedury dopasowania parametrów modelu do wyników doświadczalnych uzyskiwanych w standardowej sferze 20-l. Przedstawiono kilka rozszerzeń i poprawek poprawiających jakość dopasowania.

Dopasowanie parametrów modelu jest procedurą złożoną, ponieważ w wyniku dopasowania należy łącznie wyznaczyć osiem parametrów. Dodatkowo, wynikiem testów w 20-l jest zależność ciśnienia wybuchu od czasu, podczas kiedy podstawowe równanie modelu opisuje zmiany szybkości narastania ciśnienia wybuchu. Wyznaczenie laminarnej szybkości spalania polega zatem na dopasowaniu ośmiu parametrów funkcji danej równaniem różniczkowym zwyczajnym pierwszego stopnia, przy czym zależność od parametrów jest silnie nieliniowa. Z tego powodu konieczne jest bardzo precyzyjne zaprojektowanie procedury dopasowania tak, aby

uzyskać możliwie dobrą zbieżność i oszacowanie parametrów modelu, zwłaszcza laminarnej szybkości spalania  $S_L$ , obarczone akceptowalnymi niepewnościami pomiaru.

W momencie, kiedy wybuch jest już rozwinięty położenie granic płomienia oblicza się z równań, w których poszukiwane parametry występują w postaci uwikłanej. Rozwiązanie tych równań znajduje się numerycznie. W głównym równaniu modelu położenie granic płomienia występuje w postaci wyrażenia  $r_{front}^3 - r_{rear}^3$ . Wyrażenie takie jest typowym miejscem generowania dużych błędów numerycznych. W przypadku płomieni o niewielkiej grubości  $r_{front}^3 \approx r_{rear}^3$ . Różnica takich wielkości pomnożona następnie przez wyrażenie o dużej wartości powoduje bardzo dużą niepewność obliczenia wartości końcowej. Aby tego uniknąć, warto zadbać o większą dokładność obliczania granic płomienia. W pracy podano rozwiązania analityczne równań opisujących położenie granic płomienia. Wyeliminowano w ten sposób potrzebę numerycznego znajdowania ich rozwiązań.



Rys. 16. Porównanie kilku przebiegów zmian ciśnienia wybuchu pyłu lycopodium w tych samych warunkach. Koncentracja nominalna  $C_n = 875 \text{ g/m}^3$

Pewne trudności w zastosowaniu procedury dopasowania stwarzały dane doświadczalne. Rys 16 przedstawia wyniki pomiarów zmian ciśnienia wybuchu w mieszaninie Lycopodium-powietrze podczas czterech wybuchów przeprowadzonych w takich samych warunkach. Mimo to wyraźnie widać różnice pomiędzy poszczególnymi wykresami ciśnienia. Znaczne przesunięcia przebiegów na osi czasu wskazują, że zapoczątkowanie poszczególnych wybuchów następowało w niektórych przypadkach po upływie długiego czasu, sięgającego nawet 60 ms. Takiego przesunięcia nie przewiduje model. Zakłada on, że wybuch rozpoczyna się natychmiast po zadziałaniu źródła zapłonu. Trudno też uwzględnić w modelu zjawisko powodujące opóźnienie zapłonu, ponieważ jego natura nie jest oczywista. Jest prawdopodobne, że za opóźnienie jest odpowiedzialnych kilka zjawisk. Pamiętając o zasadniczym celu obliczeń łatwiej jest wprowadzić dodatkowy parametr korygujący, odgrywający rolę czasu opóźnienia wybuchu  $t_i$ . Wprowadzenie czasu opóźnienia wybuchu wymaga modyfikacji podstawowego równania modelu, które przybiera teraz postać

$$\frac{dP}{dt} = \frac{P_e - P_o}{V} \left(\frac{P}{P_o}\right)^{\frac{1}{\gamma}} 4\pi S_u \frac{r_{front}^3 - r_{rear}^3}{3\delta} \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{t - t_i}{\sigma}\right)\right]$$

gdzie erf jest funkcją błędu zdefiniowaną jako

$$\operatorname{erf}(z) \equiv \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt$$

Obok czasu opóźnienia zapłonu powyższe równanie wprowadza jeszcze jeden parametr  $\sigma$ , którego wartość należy odpowiednio dobrać. Wartość ta powinna być rzędu rozdzielczości czasowej wyników pomiaru ciśnienia.

Należy podkreślić, że wprowadzona modyfikacja modelu nie jest rozszerzeniem modelu poprzez uwzględnienie dodatkowych zjawisk odpowiedzialnych w tym wypadku za efekt opóźnienia zapłonu. Jest to raczej oddzielenie z wyników doświadczalnych tej części zjawisk, których model nie uwzględnia tak, aby poprawić jakość dopasowania parametrów modelu.

Wyznaczenie parametrów równania modelu polega na znalezieniu najlepszej zgodności, w sensie  $\chi^2$ , funkcji opisującej zmiany ciśnienia w czasie z przebiegami doświadczalnymi, przy czym funkcja ta jest dana równaniem różniczkowym zwyczajnym pierwszego rzędu. Zależność funkcji od parametrów jest nieliniowa, a to oznacza, że procedura dopasowania jest procedurą iteracyjną. W każdym kroku iteracji należy całkować numerycznie równanie modelu, co pogarsza zbieżność procedury i powiększa niepewność wyznaczenia parametrów. Może nawet utrudniać lub wręcz uniemożliwiać uzyskanie zbieżności.

Zamiast całkować równanie modelu można zróżniczkować zależność zdefiniowaną wynikami pomiarów i bezpośrednio przeprowadzić dopasowanie funkcji danej tym równaniem do tak przygotowanych danych. Różniczkowanie przeprowadza się tylko raz, na początku obliczeń. W stosunku do wcześniej opisanej, metoda ta wykazuje pewne zalety pod warunkiem, że proces obliczania pochodnej wyników doświadczalnych nie wprowadzi znacznej niepewności. Kluczowe znaczenie ma zatem jakość metody aproksymacji pochodnej zmian ciśnienia w funkcji czasu otrzymanych w wyniku pomiarów.

Do estymacji zależności  $P(t)$  wykorzystano metodę globalną, która konstruuje estymator szukanej zależności funkcyjnej wykorzystując informacje niesione przez wszystkie punkty doświadczalne w wybranym przedziale czasu. Estymację funkcji opisującej zmiany ciśnienia wybuchu w czasie przeprowadzono powszechnie stosowaną metodą najmniejszych kwadratów, uzupełnioną więzami wymuszającymi odpowiednią gładkość rozwiązania:

$$\chi^2 = \sum_i \frac{[P_i - f(t_i)]^2}{\sigma^2(P_i)} + \lambda \int_{t_i}^{t_f} [f''(t)]^2 dt$$

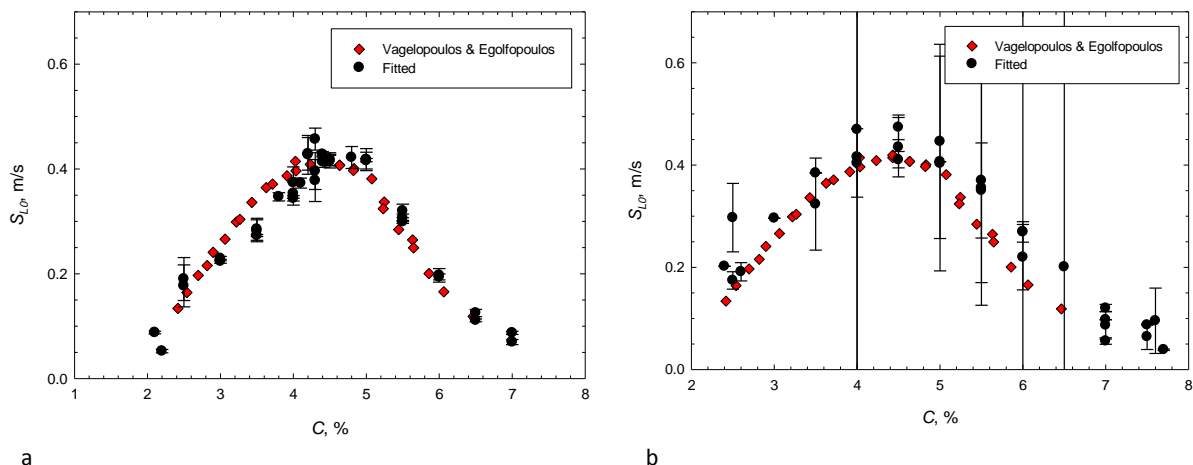
Stopień gładkości rozwiązania kontroluje parametr  $\lambda$ . W ogólnym przypadku, odpowiedni dobór wartości tego parametru jest problemem nietrywialnym, jednak w rozpatrywanym zastosowaniu wystarczająco dobre rezultaty daje prosta obserwacja jakości dopasowania.

Obliczenia wykonane z wykorzystaniem opisanych metod potwierdziły znaczną poprawę jakości dopasowania równania modelu do wyników pomiarów ciśnienia wybuchu w sferze 20-l i w konsekwencji istotne zmniejszenie niepewności wyznaczenia laminarnej szybkości spalania.

**Publikacja 5:** Dyduch Z., Skjold T.: *An assessment of the laminar burning velocity in dust/air mixtures based on a model for dust explosions in closed 20-litre vessels*, Proceedings of the 8<sup>th</sup> Eighth International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions, Yokohama 5-10 September 2010

W publikacji opisano wyniki badań będących kontynuacją prac przedstawionych w poprzednich dwóch publikacjach. Rozszerzono zarówno część eksperymentalną jak i numeryczną badań. Część eksperymentalną zrealizowano w dwóch ośrodkach: w Kopalni Doświadczalnej *Barbara* Głównego Instytutu Górnictwa i laboratorium Uniwersytetu w Bergen w Norwegii. Wykonano serie pomiarów ciśnienia wybuchu w mieszaninie propan-powietrze i kilku mieszaninach pył-powietrze, w szerokim zakresie koncentracji paliwa. Do wyznaczenia laminarnej szybkości spalania  $S_L$  i grubości laminarnego płomienia  $\delta_L$  użyto zoptymalizowanej procedury dopasowywania parametrów modelu do danych doświadczalnych.

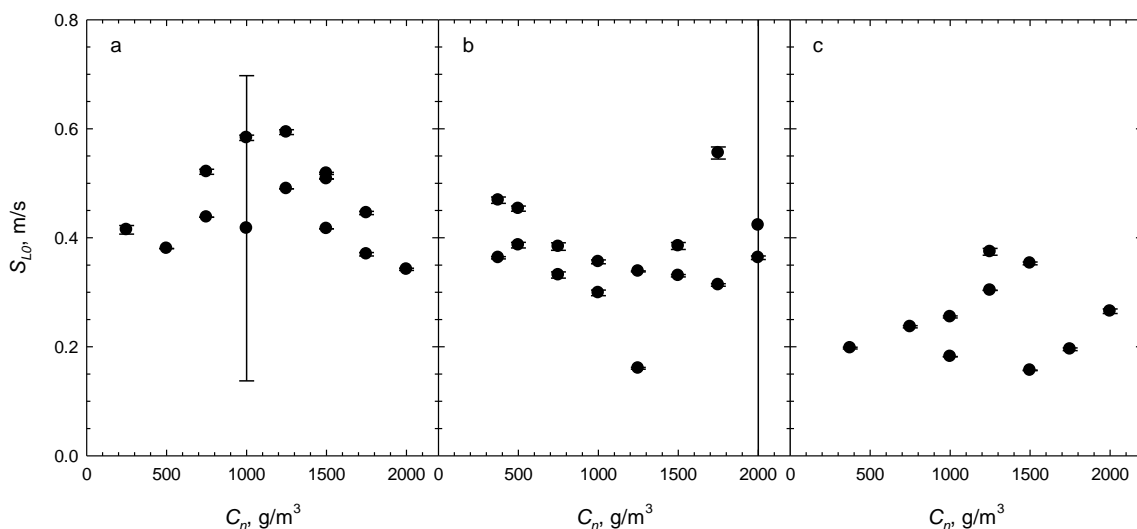
Aby zweryfikować poprawność procedury wyznaczania  $S_L$  i  $\delta_L$ , zastosowano ją do serii pomiarów ciśnienia wybuchu propanu w warunkach braku turbulencji i turbulencji generowanej standardowym podmuchem w sferze 20-l. Wyniki tej części badań przedstawiają wykresy na Rys. 17. Oba zestawy wyników porównano z danymi uzyskanymi standardową metodą.



Rys. 17. Laminarna szybkość spalania mieszanin propan-powietrze; mieszaniny stacjonarne (a) i turbulenty (b)

W przypadku mieszanin stacjonarnych zgodność uzyskanych wyników z wynikami odniesienia jest dobra. Warto zauważyć, że stosowana procedura dopasowania parametrów pozwala rozszerzyć zakres wyników tak w kierunku mieszanin ubogich jak i bogatych. W przypadku mieszanin turbulentnych zgodność jest gorsza. Wyznaczone wartości  $S_L$  są nieco większe od oczekiwanych. Zwraca uwagę bardzo duża niepewność wyznaczenia wiążąca się z trudnościami w oszacowaniu grubości płomienia. Ten problem został już wcześniej zidentyfikowany przez A. Dahoe i L.P.H. de Goey. Zaobserwowali oni, że niepewności wyznaczenia zmniejszają się do akceptowalnych wartości, kiedy grubość płomienia stanowi co najmniej 2% promienia przestrzeni, w której prowadzi się badania.

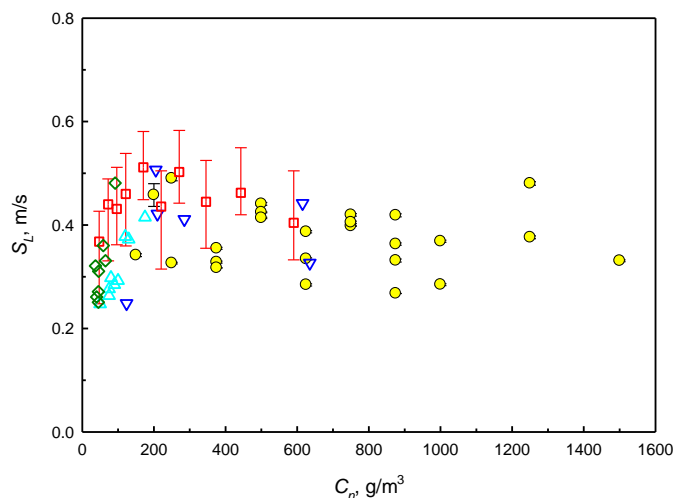
Skrobia kukurydziana łatwo absorbuje wilgoć, co powoduje znaczące zmiany jej właściwości wybuchowych. Rys. 18 przedstawia wyniki uzyskane dla tego pyłu o różnej zawartości wilgoci. Jakościowo, wyniki prezentują prawidłową zależność od zawartości wilgoci. Laminarna szybkość spalania spada ze wzrostem zawartości wilgoci. Rozrzut punktów jest jednak bardzo duży i trudno jest znaleźć tendencję charakterystyczną dla tego typu zależności, znaną z pomiarów przeprowadzonych dla mieszanin gazowych.



Rys. 18. Laminarna szybkość spalania mieszanin skrobia kukurydziana-powietrze o różnej zawartości wilgoci: (a)  $W_c = 5.5\%$ ; (b)  $W_c = 8.0\%$ ; (c)  $W_c = 12.5\%$

Podobne trudności można zaobserwować na wykresie zamieszczonym na kolejnym rysunku (Rys. 19), gdzie oszacowanie  $S_L$  zostało porównane z wynikami innych eksperymentów. Uzyskano dość dobrą zgodność

wyników, choć rozrzut punktów jest bardzo duży. Praktycznie brak też zależności  $S_L$  od koncentracji nominalnej pyłu, co jest wynikiem trudnym do wyjaśnienia.



Rys. 19. Laminarna szybkość spalania w funkcji koncentracji pyłu Lycopodium

Wszystkie wykonane do tej pory prace związane z przygotowaniem optymalnej metodologii wyznaczania laminarnej szybkości spalania i być może grubości laminarnego płomienia w mieszaninach pył-powietrze potwierdziły atrakcyjność i przydatność tej metodologii. Jednocześnie ujawniły też trudności związane z wiarygodnym wyznaczeniem poszukiwanych parametrów.

W dotychczasowych badaniach stosowano tylko dwa pyły: pył Lycopodium i skrobię kukurydzianą. Te pyły, które bardzo łatwo poddają się badaniom wybuchowości. Wyniki uzyskiwane za ich pomocą z reguły mają niewielkie niepewności pomiarowe. Skoro zastosowanie opisywanej metodologii do tych pyłów stwarza poważne trudności, należy oczekiwać, że zastosowanie jej do pyłów „trudniejszych” trudności te zwielfokrotni. Przyczyny tych trudności nie zostały jeszcze zidentyfikowane. Mogą wiązać się ze zjawiskami charakterystycznymi dla wybuchów pyłów, np. niejednorodnością obłoków pyłu, niedostateczną powtarzalnością turbulencji generowanej przez system dyspersji pyłu itp. Przyczyna trudności może też tkwić w niepoprawności relacji między turbulentną szybkością spalania, laminarną szybkością spalania i parametrami opisującymi turbulencję. Przeprowadzone badania wykazały, że poprawność tej relacji odgrywa w omawianej metodologii rolę absolutnie kluczową.

## PODSUMOWANIE

Przedstawione publikacje stanowią istotny wkład do badania właściwości zapalnych i wybuchowych pyłów węglowych. Metodologia jest uniwersalna i może być oczywiście stosowana do oznaczania właściwości innych pyłów przemysłowych. Publikacje skupiają się na trzech rodzajów zagadnień.

1. Umożliwiają lepszą interpretację otrzymywanych oszacowań. Wskazują na rozbieżność warunków, w których jest oznaczana minimalna temperatura zapłonu warstwy pyłu według standardowej procedury w stosunku do typowych sytuacji w rzeczywistych instalacjach przemysłowych. Dotyczy to zarówno warstw pyłu o niewielkiej grubości, jak i warstw grubych. Wykonane pomiary wykazały, że utrzymywanie w standardowej procedurze stałej temperatury płyty grzejnej prowadzi do zawyżenia wartości minimalnej temperatury zapłonu warstwy pyłu w wyniku odpływu ciepła z rozwijającego się w pyłe ogniska tlenu do płyty grzejnej. Przeprowadzone pomiary wykazały też, że w przypadku warstw pyłu o dużej grubości zastosowanie standardowej, zdefiniowanej w normach metody oznaczania także prowadzi do zawyżenia minimalnej temperatury zapłonu warstwy pyłu. W tym przypadku ograniczony rozmiar podłużny warstwy pyłu jest powodem zmiany charakteru zjawiska i w rezultacie oddalenie się od typowych warunków przemysłowych.

2. Poprzez zastosowanie statystycznych metod opracowywania wyników pomiarów podają sposób oznaczania maksymalnego ciśnienia wybuchu  $p_{max}$  i stałej  $K_{St,max}$ . Pozwala też lepiej oszacować wartości tych parametrów, jak również ocenić niepewność ich oznaczenia. Umożliwiają także zastosowanie odpowiednich korekt uzyskanych oszacowań w przypadku pyłów, których badanie następuje pewne trudności. Pozwala to na większą swobodę doboru dyszy dyspersyjnej, najlepiej odpowiadającej właściwościom badanego pyłu, np. w przypadku materiałów o strukturze włóknistej. Umożliwiają także porównywanie wyników oznaczeń parametrów wybuchowości prowadzonych za pomocą różnej aparatury pomiarowej. Metoda korekcji umożliwia uwzględnienie wpływu różnych intensywności turbulencji na uzyskiwane wyniki.
3. Prezentują sposób wykorzystania nowej metodologii wyznaczania laminarnej szybkości spalania – podstawowego parametru opisującego właściwości wybuchowe mieszanin pył-powietrze. Potwierdzają praktyczną użyteczność tej metodologii. Uzyskanie wyników doświadczalnych stanowiących dane wejściowe części obliczeniowej wymaga tylko niewielkiej modyfikacji standardowej procedury oznaczania maksymalnego ciśnienia wybuchu  $p_{max}$  i stałej  $K_{St,max}$ . Nowa metodologia pozwala na oszacowanie laminarnej szybkości spalania w mieszaninie pył-powietrze także w obłokach pyłów o dużej koncentracji. Stosowane dotychczas metody nie umożliwiały takich oznaczeń. Jednocześnie pokazują wciąż istniejące trudności ograniczające możliwość szerszego stosowania tej metodologii. Zasadniczym problemem pozostaje prawidłowa relacja wiążąca turbulentną szybkość spalania  $S_u$  z laminarną szybkością spalania  $S_L$  i parametrami definiującymi turbulencję: średniokwadratową prędkością pulsacyjną  $u'_{rms}$  i charakterystyczną skalą długości turbulencji  $l_T$ , a także zależność szybkości spalania od temperatury i ciśnienia.

## POZOSTAŁA DZIAŁALNOŚĆ NAUKOWO-BADAWCZA

Moja działalność zawodowa wiąże się z Laboratorium Wybuchowości Pyłów Przemysłowych Głównego Instytutu Górniczego. Od początku swojej pracy uczestniczyłem i kierowałem pracami badawczymi w zakresie wybuchowości pyłów przemysłowych realizowanymi zarówno dla podmiotów krajowych, jak i zagranicznych. Prace te można podzielić na kilka grup.

### 1. Prace badawcze

W większości były to doświadczenia w dużej skali, w podziemnych chodnikach doświadczalnych, powierzchniowej sztolni doświadczalnej, a w kilku przypadkach w skali średniej. Współuczestniczyłem w projektach finansowanych z funduszu Marii Curie-Skłodowskiej, a także realizowanych w ramach Programów Ramowych Unii Europejskiej. Były to prace mające na celu sprawdzanie skuteczności nowych metod hamowania i izolowania wybuchów pyłów przemysłowych. Jeden z projektów był poświęcony wypracowaniu nowej metodologii oceny ryzyka wybuchu w przemyśle w kontekście dyrektywy Seveso II. Kierowałem, ze strony Głównego Instytutu Górniczego, pracami w projekcie realizowanym na rzecz obronności i bezpieczeństwa państwa mającym na celu wypracowanie nowych technologii zabezpieczania przed wybuchem miejsc składowania materiałów sypkich. Obecnie jestem współuczestnikiem projektu finansowanego przez Fundację Węgla i Stali, którego celem jest opracowanie metod ograniczających zniszczenia urządzeń i aparatury o krytycznym znaczeniu w kopalniach podziemnych w wyniku wybuchu metanu.

Uczestniczę też w badaniach skuteczności hamowania wybuchów pyłu węglowego za pomocą pyłów kamiennych o różnych właściwościach. Badania są prowadzone w wyrobiskach podziemnych Kopalni Doświadczalnej Barbara GIG dla amerykańskiego instytutu NIOSH.

Od lat kieruję licznymi pracami realizowanymi dla firmy Shell International Limited. Są to badania wybuchowości licznych gazów, par cieczy palny i pyłów. Badania te są prowadzone w różnych skalach, począwszy od standardowej sfery 20-l, poprzez komorę badawczą o objętości 1 m<sup>3</sup> aż do badań w dużej komorze o objętości 5 m<sup>3</sup>.

Na zlecenie Państwowego Instytutu Maszyn Rolniczych kierowałem badaniami oddziaływania wybuchu pyłu zbożowego na ściany silosu o objętości 136 m<sup>3</sup>.

## 2. Prace badawczo-usługowe

W Laboratorium Wybuchowości Pyłów Przemysłowych kieruję rocznie ok. 100 pracami na rzecz podmiotów zagranicznych i krajowych. Są to zwykle prace trojakiemu rodzaju:

- oznaczenia parametrów zapalności i wybuchowości pyłów
- oceny ryzyka wybuchu pyłu w instalacjach przemysłowych
- badania systemów ochronnych ograniczających skutki wybuchu pyłu w ramach procedury badania typu wprowadzonej dyrektywą ATEX.

Pewną część tego rodzaju prac stanowią badania nietypowe. Uzyskanie poszukiwanych informacji wymaga wtedy zbudowania nowego stanowiska badawczego. Bywają to zarówno stanowiska laboratoryjne, jak i konstrukcje większej skali przygotowywane na poligonie doświadczalnym.

Wśród podmiotów zagranicznych znajdują się instytucje z Holandii, Niemiec, Czech, Węgier, Bułgarii i Bośni i Hercegowiny.

W kraju kierowałem pracami dla niemal wszystkich dużych zakładów energetycznych i wielu dużych koncernów międzynarodowych, takich jak Philips, Bosch, Bridgestone, Michelin, Procter&Gamble, Alstom, Foster Wheeler, Henkel, Toyota, General Motors Manufacturing i wielu innych.

## 3. Ekspertyzy

Jako członek komisji powypadkowych, biegły powoływany przez prokuraturę lub niezależny ekspert przygotowałem ekspertyzy dotyczące przyczyn wybuchów pyłu w polskim przemyśle. Niektóre ekspertyzy obejmowały także prace doświadczalne polegające na sprawdzeniu poprawności działania systemów ochronnych zaangażowanych w wybuch.

## 4. Działalność dydaktyczna

Od roku 2011 prowadzę wykłady nt. wybuchowości pyłów przemysłowych i zagrożeń wybuchem pyłu w przemyśle na studiach podyplomowych organizowanych corocznie w Głównym Instytucie Górnictwa. Regularnie uczestniczę w konferencjach organizowanych przez Ośrodek Certyfikacji Usług Przeciwpożarowych Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Pożarnictwa i inne organizacje. Prowadzę liczne szkolenia w zakresie bezpieczeństwa wybuchowego organizowane na zlecenie zakładów przemysłowych.

## INFORMACJE O DOROBKU PUBLIKACYJNYM

## Zestawienie opublikowanego dorobku naukowego

Rodzaj publikacji	Liczba publikacji					
	Przed doktoratem		Po doktoracie		Ogółem	
	Samodz.	Współaut.	Samodz.	Współaut.	Samodz.	Współaut.
Monografie	–	–	–	–	–	–
Rozdziały w monografiach	–	3	–	–	–	3
Publikacje w czasopismach z listy JCR	–	1	–	9	–	10
Publikacje w czasopismach nie będących na liście JCR	–	4	3	12	3	16
Referaty w recenzowanych materiałach konferencji międzynarodowych.	–	10	–	9	–	19
Referaty w materiałach konferencji krajowych	1	–	11	1	12	1
Patenty	–	–	–	–	–	–
Razem	1	18	14	31	15	49

## Zestawienie wygłoszonych referatów

Rodzaj	Samodzielnie		Współautor		Razem	
	j. polski	j. angielski	j. polski	j. angielski	j. polski	j. angielski
Konferencje zagraniczne	–	–	–	7	–	7
Konferencje krajowe	18	–	–	–	18	–
Referaty wygłoszone w jednostkach naukowych	1	–	–	–	1	–
Razem	19	–	–	7	19	7

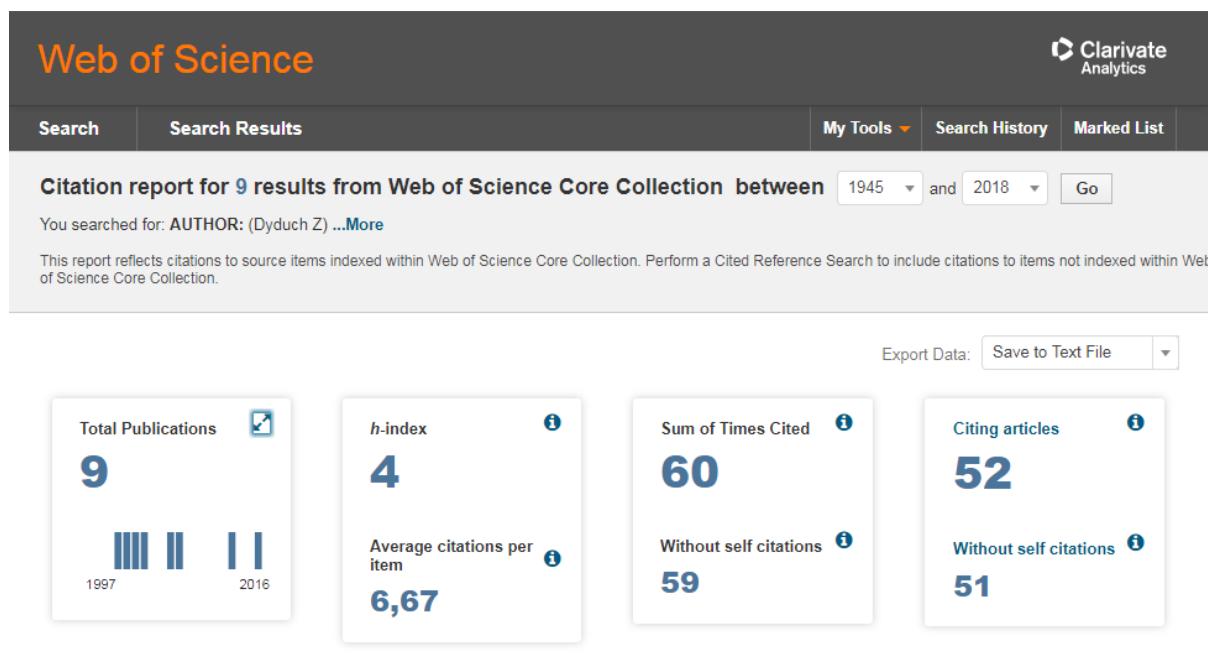
## Udział w realizacji projektów badawczych

Rodzaj	Wykonawca	Kierownik	Razem
Projekty międzynarodowe	4	–	4
Projekty krajowe	–	1	1
Prace statutowe	3	6	9
Razem	7	7	14



## Impact Factor i liczba cytowań

Baza danych	Liczba publikacji	Liczba cytowań	Indeks Hirscha
Web of Science	9	60	4
Scopus	9	75	4
Research Gate	9	80	5



## Stats is becoming part of your Mendeley profile

We are pleased to announce that we will soon be integrating the Stats dashboard with your profile so that you can monitor the impact of your work and showcase it to others in one place.

[More information](#)

[My Publications](#) Reviewed Publications

Citations

75

Powered by Scopus

h-index

4

Powered by Scopus

Publications

9

Powered by Scopus

Views

4 947

Powered by ScienceDirect

Readers

47

Powered by Mendeley

## Recenzje publikacji

Rodzaj czasopisma		Liczba recenzji	Łącznie
Czasopisma znajdujące się na liście JCR	Wydawnictwo polskie	2	7
	Wydawnictwo zagraniczne	5	
Czasopisma spoza listy JCR	Wydawnictwo polskie	2	6
	Wydawnictwo zagraniczne	4	
Razem		13	

## Wykonane prace badawczo-usługowe

Rodzaj pracy	Wykonawca	Kierownik	Łącznie
Odbiorca polski	236	1350	1586
Odbiorca zagraniczny	8	76	84
Razem	244	1426	1670

## POZOSTAŁE OSIĄGNIĘCIA W PRACY NAUKOWO-BADAWCZEJ

## NAGRODY

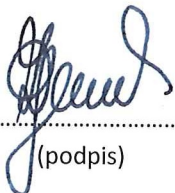
- Polska Akademia Nauk Wydział Nauk o Ziemi i Nauk Górniczych – Nagroda Naukowa im. Witolda Budryka za pracę pt. *Doświadczalny model przenoszenia wybuchu pyłu węglowego w wyrobiskach górniczych*

## PRZYNALEŻNOŚĆ DO ORGANIZACJI

- Polski Instytut Spalania

## ODZNACZENIA I STOPNIE GÓRNICZE

- Odznaka honorowa Zasłużony dla Górnictwa RP
- Srebrny Krzyż Zasługi
- Złoty Krzyż Zasługi
- Dyrektor Górniczy II stopnia
- Dyrektor Górniczy I stopnia



(podpis)