

dr inż. **Rafał POROWSKI**¹

Przyjęty/Accepted/Принят: 20.05.2014;
Zrecenzowany/Reviewed/Рецензирована: 20.11.2014;
Opublikowany/Published/Опубликована: 31.12.2014;

ZJAWISKO DETONACJI MIESZANIN PYŁOWYCH: PRZEGLĄD STANU WIEDZY

Dust Detonation Phenomenon: State of the Art

Явление детонации смесей пыли: обзор имеющихся знаний

Abstrakt

Cel: Celem artykułu jest przedstawienie przeglądu stanu wiedzy w zakresie detonacji mieszanin pyłowych. Opisano prace badawcze prowadzone przez ośrodki naukowe na całym świecie, ze szczególnym nastawieniem na badania eksperymentalne detonacji mieszanin pyłowo-powietrznych i pyłowo-tlenowych oraz mierzone podczas tych badań parametry detonacji. Wyjaśniono również podstawy teoretyczne propagacji fali spalania w kanałach rurach oraz zjawisko przejścia do detonacji (DDT).

Wprowadzenie: W większości urządzeń i aparatów procesowych stosowanych w przemyśle, w których wykorzystuje się pyły palne, zjawisko spalania występuje w formie deflagracji, gdzie transport ciepła i masy odgrywa bardzo znaczącą rolę. Deflagracja stanowi tzw. „poddźwiękowy” rodzaj spalania, w którym reakcje chemiczne procesu spalania zachodzą pod prawie stałym ciśnieniem. Front fali spalania deflagracyjnego rozprzestrzenia się z prędkością, która jest sumą prędkości płomienia oraz prędkości rozprzestrzeniania się produktów spalania. Jeśli prędkość płomienia będzie wystarczająco niska, tak jak wcześniej wspomniano, zjawisko spalania przebiegało będzie pod stałym ciśnieniem. W przeciwnym przypadku powstaną pewne zakłócenia (turbulencje) oraz wzrost ciśnienia. Wówczas front płomienia będzie przyspieszał, rozprzestrzeniając się jako tzw. fala spalania poprzedzająca falę uderzeniową. Dalsze przyspieszanie frontu płomienia może spowodować proces przejścia z deflagracji w detonację. Zjawisko detonacji mieszanin pyłowych jest raczej jednostkowym, skrajnym przypadkiem propagacji płomienia w warunkach przemysłowych, co nie oznacza oczywiście, że niemożliwym do wystąpienia.

Metodologia: Artykuł został opracowany na podstawie przeglądu literatury, dostępnych w publikacjach wyników prac naukowych dotyczących zjawiska detonacji w mieszaninach pyłowych.

Wnioski: Pomimo że badania detonacji w mieszaninach pyłowych prowadzone są już od wielu lat przez czołowe ośrodki naukowe na świecie, to w dalszym ciągu istnieje potrzeba poznania podstawowych parametrów tego procesu oraz czynników mających wpływ na to zjawisko. Szczególnie istotne z praktycznego punktu widzenia bezpieczeństwa w przemyśle wydaje się być opracowanie bazy danych o parametrach detonacji w mieszaninach pyłowych, takich jak przede wszystkim szerokość komórki detonacji, granice detonacji, prędkości detonacji, odległości rozbiegowe do DDT, jak również krytyczny rozmiar cząstek pyłu, w których możliwe byłoby przejście od spalania deflagracyjnego do detonacji w mieszaninach pyłowych.

Słowa kluczowe: detonacja, DDT, zagrożenie wybuchem, pyły palne

Typ artykułu: artykuł przeglądowy

Abstract

Aim: The aim of this paper is to present a state of the art on dust detonation phenomenon. The author described some research works done in different research institutions, including experimental works on dust-air and dust-oxygen detonations and measured parameters, e.g. pressure and velocity profiles. The author also described some fundamental theories on blast wave propagation in tubes and channels as well as a phenomenon called deflagration-to-detonation transition (DDT).

Introduction: In most processes equipment and apparatuses in industry, where flammable dusts are handled, combustion phenomenon exists as the deflagration flame with great influence of heat and mass transfer. Deflagration is a mode of subsonic combustion wave, where chemical kinetics undergoes under almost constant pressure. Deflagration front propagates with velocity, which is a sum of flame speed and combustion products velocity. If the flame speed will be low enough then combustion occurred at almost constant pressure. In other way there will be some turbulence at the flame front and pressure will increase. Flame front will accelerate and in some circumstances the deflagration to detonation process will occur. Dust detonation phenomenon seems to be an unique case of flame

¹ Centrum Naukowo-Badawcze Ochrony Przeciwpożarowej im. Józefa Tuliszkowskiego Państwowy Instytut Badawczy; ul. Nadwiślańska 213, 05-420 Józefów; rporowski@cnbop.pl / Scientific and Research Centre for Fire Protection – National Research Institute, Poland;

propagation in the process industries which is of course possible to take a place in apparatus and pipelines transporting combustible dusts. Heat transfer from the burning dust cloud to the unburnt part does not proceed by the diffusion like in the deflagration explosion. It is possible by extremely fast compression of unburnt mixture covered by the shock wave propagating with high-speed velocity.

Methodology: Paper was prepared based on the state of the art taken from available literature and results of experimental works on dust detonation phenomenon.

Conclusions: Research in dust detonation phenomenon is the ongoing process from many years but there is still a gap of knowledge of fundamental parameters and correlations. An important matter could be to provide the database of detonation cell size, propagation velocity, detonation limits, run-up distance and also some critical size of dust particle supporting DDT in dust mixtures.

Keywords: detonation, DDT, explosion hazards, combustible dusts

Type of article: review article

Аннотация

Цель: Цель этой статьи заключается в представлении обзора имеющихся знаний в области детонации смесей пыли. Описана научно-исследовательская работа, которая проводится исследовательскими центрами по всему миру, с особым акцентом на экспериментальные исследования детонации пылевоздушных и пылекислородных смесей, а также на измеряемые во время этих исследований параметры детонаций. В статье объяснены также теоретические основы распространения волны горения в трубах и каналах и явление перехода в детонацию (DDT).

Введение: В большинстве устройств и технологическом оборудовании, которые применяются в промышленности, где используется горючая пыль, явление горения происходит в виде дефлаграции, при которой перенос тепла и масса играет очень важную роль. Дефлаграция представляет собой так называемый инфразвуковой тип сгорания, в котором химические реакции процесса горения происходят при почти постоянном давлении. Фронт волны дефлаграционного горения распространяется со скоростью, которая является суммой скорости пламени и скорости распространения продуктов сгорания. Если скорость пламени будет достаточно низкой, как упоминалось ранее, явление сгорания будет происходить под постоянным давлением. В противном случае возникают некоторые препятствия (турбулентность) и давление увеличится. Затем фронт пламени будет ускоряться, распространяясь как, так называемая, волна горения, которая предшествует ударной волне. Последующее ускорение фронта пламени может вызвать переход от дефлаграции к детонации. Детонация пылевых смесей это редкий, крайний случай распространения пламени в промышленных условиях, но это не значит, конечно, что он не может произойти.

Методология: Статья подготовлена на основе обзора литературы, имеющейся в публикациях результатов научных исследований, касающихся явления детонации смесей пыли.

Выводы: Несмотря на то, что исследования детонации в смесях пыли проводятся на протяжении многих лет ведущими научно-исследовательскими центрами по всему миру, всё ещё существует необходимость познания основных параметров и зависимости, которые влияют на это явление. Особенно важно с практической точки зрения безопасности в промышленности создать базы данных параметров детонаций смесей пыли, таких как, в первую очередь, ширина детонации клетки, границы детонации, скорость детонации, расстояние ускорения до DDT, а также критический размер пылевых частиц, при которых возможно было бы перейти от дефлаграционного сгорания в детонацию в смесях пыли.

Ключевые слова: детонация, DDT, угроза взрыва, горючая пыль

Вид статьи: обзорная статья

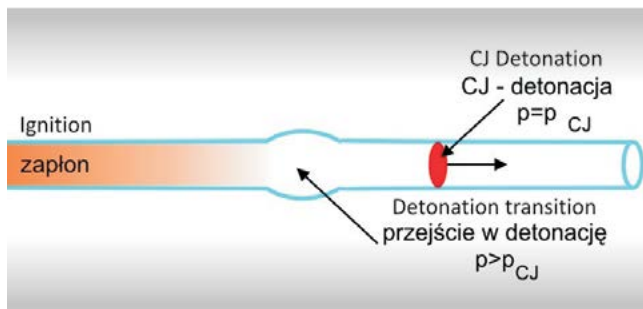
1. Wprowadzenie

W większości urządzeń i aparatów procesowych stosowanych w przemyśle, w których wykorzystuje się pyły palne, zjawisko spalania występuje w formie deflagracji, gdzie transport ciepła i masy odgrywa znaczącą rolę. Deflagracja stanowi tzw. „poddźwiękowy” rodzaj spalania, w którym reakcje chemiczne procesu spalania zachodzą pod prawie stałym ciśnieniem [1]. Front fali spalania deflagracyjnego rozprzestrzenia się z prędkością, która jest sumą prędkości płomienia oraz prędkości rozprzestrzeniania się produktów spalania. Jeśli prędkość płomienia będzie wystarczająco niska, tak jak wcześniej wspomniano, zjawisko spalania przebiegało będzie pod stałym ciśnieniem [1]. W przeciwnym przypadku, powstaną pewne zakłócenia (turbulencje) oraz wzrost ciśnienia. Wówczas front płomienia będzie przyspieszał, rozprzestrzeniając się jako tzw. fala spalania poprzedzająca falę uderzeniową. Dalsze przyspieszanie frontu płomienia może spowodować proces przejścia z deflagracji w detonację, tzw. DDT². Fala detonacyjna mieszanin różnych paliw węglowodorowych z powietrzem rozprzestrzenia się z prędkością ok. 1700-2000 m/s. Zjawisko to może rów-

nież powstać podczas transportu pyłów palnych w rurociągach procesowych stosowanych powszechnie w zakładach przemysłowych. Podobnie jak w przypadku detonacji mieszanin gazowych, detonacja mieszanin pyłowo-powietrznych jest raczej jednostkowym, skrajnym przypadkiem propagacji płomienia w warunkach przemysłowych, co nie oznacza oczywiście, że niemożliwym do wystąpienia. Wymiana ciepła z palącą się częścią chmury do jej niespalonej części nie odbywa się wtedy za pomocą dyfuzji, co jest cechą charakterystyczną wybuchów deflagracyjnych. Wymiana ciepła odbywa się za pomocą skrajnego oraz bardzo szybkiego sprężania niespalonej części mieszaniny objętej przez falę uderzeniową przechodzącą przy prędkości ponaddźwiękowej. Szczegółowy mechanizm zapłonu oraz procesu spalania wewnątrz frontu fali detonacyjnej jest nadal przedmiotem wielu badań naukowych [2-3]. Zapłon mieszaniny pyłu palnego z powietrzem można zainicjować jedynie za pomocą wystarczająco silnego źródła zapłonu [4],[5]. Minimalne energie zapłonu dla pyłów palnych mają bardzo szeroki zakres rzędu od kilkudziesięciu do ponad kilku tysięcy milidżuli [6]. Należy jednak pamiętać, że wartości energii zapłonu niezbędnych do bezpośredniej inicjacji detona-

² DDT – z ang. *Deflagration-to-Detonation Transition*.

cji mieszanin pyłowo-powietrznych są dużo wyższe, niż wspomniane wartości minimalnej energii zapłonu [4],[7] i mogą zostać wygenerowane albo poprzez określony ładunek materiału wybuchowego, lokalny wybuch mieszaniny gazowej lub wyładowanie wysokoenergetycznej iskry elektrycznej wewnątrz mieszaniny, czy też stopniowe wytwarzanie silnego uderzenia generowanego przez turbulencje i tym samym przyspieszenie propagacji płomienia, aż do przejścia zjawiska deflagracji w detonację. Rycina 1 obrazuje schematycznie proces przejścia z deflagracji do detonacji w mieszaninach palnych podczas ich spalania w rurach i kanałach.



Ryc. 1. Przejście do detonacji w rurze z mieszaniną palną [4]
Fig. 1. Deflagration to detonation transition in the channel with flammable mixture [4]

Mechanizmy prowadzące do DDT w mieszaninach pyłowo-powietrznych można podzielić na dwie zasadnicze grupy:

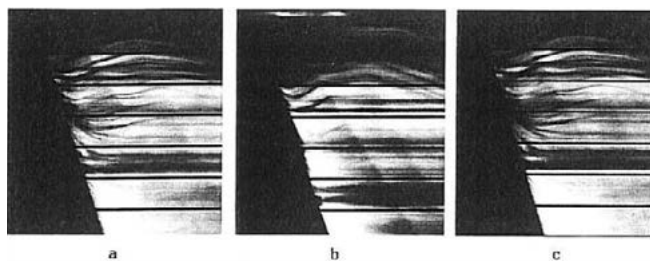
- bezpośrednia inicjacja detonacji przez falę uderzeniową,
- przejście od spalania deflagacyjnego do detonacji na skutek procesu przyspieszenia frontu spalania, wzajemnego oddziaływania frontu spalania i fali uderzeniowej lub frontu spalania i ścianek rury, jak również w wyniku lokalnego wybuchu cieplnego niespalonej części mieszaniny palnej.

Pierwsza z tych grup stanowi zasadniczo proces bezpośredniej inicjacji, gdy fala uderzeniowa jest wystarczająco silna do zapłonu mieszaniny palnej wraz z gwałtownym łączeniem się frontu spalania z falą uderzeniową, tworząc tym samym falę detonacyjną. Druga grupa mechanizmów prowadzących do DDT stanowi znacznie bardziej złożony problem, ponieważ zawiera zagadnienia dotyczące dynamiki przepływów wielofazowych, ze szczególnym uwzględnieniem przepływu turbulentnego, kinetyki reakcji chemicznych oraz niestabilności na froncie fali spalania.

2. Przegląd badań

W 1925 roku Greenwald i Wheeler [5],[13] przeprowadzili badania eksperymentalne w zakresie propagacji płomienia dla mieszanin pyłu węgla z powietrzem w galerii kopalni doświadczalnej. Galeria ta z jednej strony była otwarta, a z drugiej strony zainstalowano źródło zapłonu. Stwierdzono, że podczas spalania pyłu płomień przyspieszał, aż do momentu, gdy pod koniec galerii prędkość propagacji ustabilizowała się na poziomie ok. 800 m/s. Wartość ta jest znacznie mniejsza niż teoretyczna wartość

prędkości detonacji wg modelu CJ, co świadczy o tym, że w tym przypadku miało miejsce spalanie deflagacyjne. Podobne badania dla pyłu węgla w Polsce przeprowadził Cybulski w latach 50. XX wieku [14]. Większość badań doświadczalnych w zakresie detonacji mieszanin pyłowo-powietrznych przeprowadzono w rurach i kanałach, w których pył palny był zazwyczaj rozpraszany w tlenie, aby zwiększyć reaktywność mieszaniny [8]. W badaniach tych zazwyczaj notowano prędkości rozprzestrzeniania się fali spalania ok. 1500 m/s, co świadczyło o tym, że doszło do zjawiska DDT. Na rycinie 2 przedstawiono fotografie smugowe obrazujące proces przejścia do detonacji w mieszaninie węgla brunatnego z tlenem [12]. Tego typu „gładkie” przejście do detonacji w mieszaninach pyłowo-powietrznych odnosi się do określonych warunków brzegowych, wśród których główną rolę odgrywają rozmiary rury lub kanału badawczego. Jeśli rura badawcza będzie za krótka lub o zbyt małej średnicy wewnętrznej, wówczas nastąpi jedynie zjawisko tzw. quasi-detonacji [2].



Ryc. 2. Fotografie smugowe obrazujące proces przejścia do detonacji w mieszaninie węgla brunatnego z tlenem. Stężenie pyłu w mieszaninie: a) 280 g/m³, b) 540 g/m³, c) 1400 g/m³ [12]
Fig. 2. Shadowgraph images of DDT in brown coal mixtures with oxygen. Concentrations of dust: a) 280 g/m³, b) 540 g/m³, c) 1400 g/m³ [12]

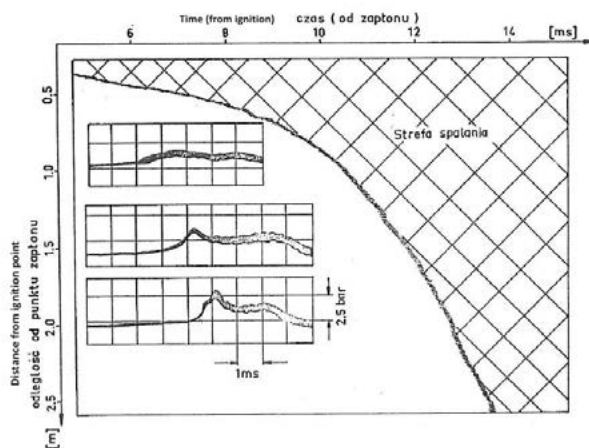
Wielu badaczy wskazało na dowody potwierdzające zjawisko detonacji pyłów palnych w kanałach o małych średnicach. Na przykład Kauffman i inni [9] zdemontowali, że samopodtrzymująca się fala detonacyjna może propagować w mieszaninach pyłu owsa i pszenicy z powietrzem, wewnątrz pionowych kanałów w warunkach laboratoryjnych, o przekroju 6,35 cm x 6,35 cm i długości 6 m. Pył został wprowadzony do rury o masie wystarczającej do osiągnięcia pożądanego stężenia pyłu podczas grawitacyjnego osadzania się pyłu na dnie rury. Wybuch pyłu został zainicjowany poprzez lokalny wybuch mieszaniny wodoru z tlenem na początku rury. Przy stężeniu pyłu owsa o wartości 250-270 g/m³ (lekko poniżej stechiometrycznego) zmierzona prędkość propagacji fali detonacyjnej wyniosła 1540 m/s, co stanowi niższą wartość niż teoretyczna prędkość detonacji wg teorii Chapman-Jouguet [2], przy stężeniu stechiometrycznym, wynosząca 1800 m/s. Jest to jednak wartość, której się spodziewano, z uwagi na fakt, iż nieuchronne straty energii w rzeczywistej detonacji pyłu spowodowały powstanie realnej prędkości frontu fali detonacyjnej, która, jak już wcześniej wspomniano, jest niższa niż wartość teoretyczna. Najwyższy zmierzony skok ciśnienia wyniósł około 24 bar, co stanowi przybliżoną wartość teoretycznego ciśnienia wg teorii CJ przy stężeniu stechiometrycznym, równą 22,4 bar. Kauffman i inni [9] prowadzili rów-

niez badania w zakresie górnej i dolnej granicy detonacji mieszanin pyłu owsa z powietrzem, w rurach w skali laboratoryjnej. Odkryli, że detonację można zainicjować za pomocą bardzo silnego źródła zapłonu, przy wąskim zakresie stężenia, w przybliżeniu 200-450 g/m³. Gardner i inni [10] dostarczyli następnie rozstrzygające dane doświadczalne na temat zjawiska detonacji w mieszaninach zawierających części lotne pyłu węglowego z powietrzem. Stwierdzono, że przejście do detonacji w mieszaninach pyłowo-powietrznych może być powodem turbulentnego przyspieszenia płomienia. Gardner [10] przeprowadził swoje badania doświadczalne w komorze spalania o pojemności 20 m³ przyłączonej do cylindrycznej rury testowej o długości 42 m i średnicy 0,6 m, której jeden koniec był otwarty. Aby rozpocząć doświadczenie, wdmuchnięto powietrze o objętościowym natężeniu przepływu, dającym uśrednioną prędkość przepływu w rurze równą 20-30 m/s. Wówczas pył został doprowadzony do strumienia przepływającego powietrza tuż przy komorze spalania, aby osiągnąć założone stężenie pyłu w zakresie od 30 g/m³ do 850 g/m³, zarówno w komorze, jak i w rurze testowej. Mieszaninę pyłu inicjowano w komorze za pomocą płomienia strumieniowego lub zapalnika chemicznego. Największy skok wartości ciśnienia, który odnotowano, wyniósł 81 bar(g), zmierzony w miejscu rury, gdzie powstało zjawisko DDT. Potwierdza to ogólne założenie, że przy DDT zawsze będzie istniała sytuacja, w której fala detonacyjna osiągnie większe wartości niż te spełniające teoretyczne założenia warunków wg teorii CJ. Podczas tego przejściowego okresu ciśnienie detonacji może przekroczyć wartości teoretycznego ciśnienia CJ.

Wolański i inni [15] przeprowadzili badania doświadczalne oraz obliczenia numeryczne, w których dokonali szczegółowej analizy struktury fali detonacyjnej dla mieszanin pyłowych oraz opracowali model numeryczny do szacowania strefy reakcji frontu fali detonacyjnej, przy uwzględnieniu zarówno efektu przepływu dwufazowego, jak i strat ciepła na ściankach rury badawczej. Założono w tym modelu, że przepływ w strefie reakcji jest jednowymiarowy oraz ustalony, a cząstki pyłu biorące udział w reakcji spalania są w kształcie sferycznym, o tej samej temperaturze oraz w otoczeniu tego samego gazu. Zaadaptowano również uproszczony model spalania pyłu, przy założeniu heterogenicznej reakcji spalania. Na tej podstawie dokonano obliczeń w zakresie prędkości fali detonacyjnej dla wybranych pyłów palnych, które okazały się być zbliżone do wyników eksperymentów. Kulikovskii [16] zbadał obecność zbieżnych sferycznych i cylindrycznych fal detonacyjnych w mieszaninach pyłowych. Na podstawie jego analizy teoretycznej stwierdzono, że stosunek dwóch bezwymiarowych parametrów określa wpływ cząstek pyłu na strukturę fali detonacyjnej. Pierwszym z tych parametrów jest stosunek objętości cząstek pyłu w mieszaninie do całkowitej objętości mieszaniny, a drugi parametr to stopień zakrzywienia cylindrycznej lub sferycznej fali detonacyjnej. Jeśli pierwszy parametr jest mniejszy niż drugi, wówczas cząstki pyłu będą miały znikomy wpływ na strukturę fali detonacyjnej.

Zhang [17] przeprowadził badania doświadczalne w zakresie propagacji fali detonacyjnej w poziomej rurze

o średnicy wewnętrznej 140 mm i długości 17,4 m dla stechiometrycznej mieszaniny skrobii kukurydzianej z tlenem. Dla warunków ciśnienia początkowego 1 bar Zhang zaobserwował zjawisko detonacji dla zakresu stężeń pyłu w mieszaninie od 300 g/m³ do 9000 g/m³. Największą prędkość detonacji równą 1988 m/s odnotowano dla stężenia pyłu 2000 g/m³, a najwyższe ciśnienie wynoszące 66,9 bar dla stężenia 3000 g/m³. W swoich badaniach Zhang doszedł do wniosku, że zjawisko ustalonej detonacji pyłowej nie powinno być porównywane do klasycznego ujęcia detonacji wg modelu CJ, przede wszystkim z uwagi na zbyt długi całkowity czas reakcji spalania pyłu, co zasadniczo wpływa na zależność propagacji detonacji od aparatury badawczej. Wójcicki i Teodorczyk [18] zbadał doświadczalnie zjawisko detonacji w mieszaninach pyłu węglowego z tlenem. Badania te przeprowadzono w pionowym kanale o przekroju 50 x 50 mm i długości 3,6 m. Przednia ściana kanału badawczego wykonana była ze szkła organicznego, co umożliwiło wykonanie fotografii w trakcie propagacji fali spalania. Jako źródło zapłonu zastosowano świecę zapłonową zasilaną z baterii kondensatorów. Podczas eksperymentów rejestrowano zmiany prędkości propagacji fali spalania oraz towarzyszące im zmiany ciśnienia i temperatury, przy użyciu czujników pomiarowych wzdłuż kanału, jak również szybkiej kamery bębnowej. Odnotowali oni, że w badanych mieszaninach fala spalania w miarę rozprzestrzeniania się wzdłuż kanału przyspieszała, ostatecznie prowadząc do powstania fali detonacyjnej, propagującej z prędkością ok. 1800-2200 m/s. Stwierdzili oni, że prędkość fali spalania w dowolnym punkcie jej toru stanowi sumę prędkości fali względem mieszaniny i prędkości mieszaniny, w której fala się rozprzestrzeniała. Znając tor fali spalania i tor fali prostej w punkcie ich przecięcia, wyznaczyli oni prędkość propagacji fali spalania względem mieszaniny palnej, co przedstawiono na rycinie 3.

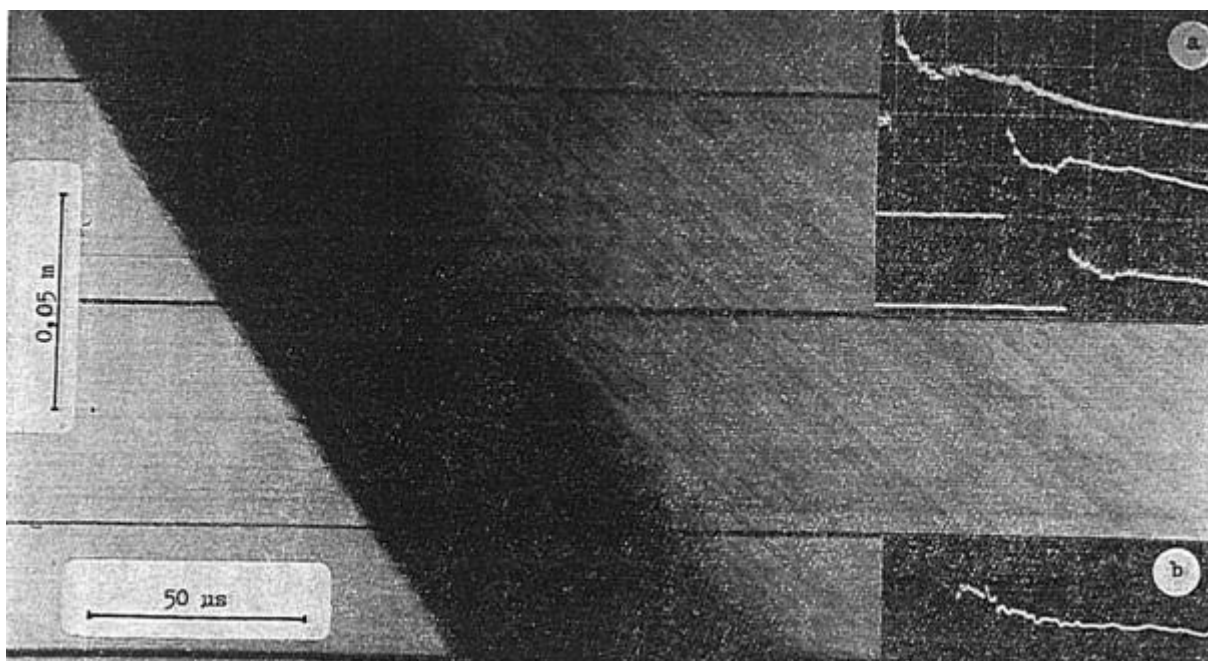


Ryc. 3. Proces propagacji fali spalania i towarzyszące mu zmiany ciśnienia w mieszaninie pyłu węgla z tlenem [18]
Fig. 3. Blast wave propagation process and associated pressure changes in coal-oxygen mixture [18]

Kauffman, Nicholls i Wolański [19] przeprowadzili badania eksperymentalne w zakresie detonacji w mieszaninach kilku rodzajów pyłów z powietrzem w pionowej rurze detonacyjnej o długości 6000 mm i średnicy wewnętrznej 63,5 mm. Zbadano ok. 10 rodzajów różnych

pyłów, w tym między innymi pył owsa, pszenicy, węgla, soi, kukurydzy oraz mąki. Mieszaninę pyłową wytwarzano poprzez zasypywanie rury przez podajnik w górnej części rury. Pył podawany był za pomocą podajnika ślimakowego o regulowanej prędkości obrotowej, co umożliwiało otrzymywanie określonych stężeń mieszaniny. Jako źródło zapłonu stosowano detonację mieszaniny wodorowo-tlenowej w sekcji napędzającej rury, co powodowało powstanie silnej fali uderzeniowej inicjującej detonację mieszaniny pyłowej w sekcji testowej. Prędkość fali spalania mierzono za pomocą czujników ciśnienia rozmieszczonych wzdłuż rury, jak również wykonano laserowe fotografie smugowe zjawiska detonacji. Na rysinie 4 przedstawiono przykładową fotografię smugową zarejestrowaną podczas zjawiska detonacji w mieszaninie pyłu owsa z powietrzem. Na fotografii tej widać proces rozbijania przez falę uderzeniową aglomeracji pyłu oraz zapłon i spalanie mieszaniny pyłowo-powietrznej. Podczas tych badań zauważono, że na skutek wzbogacania powietrza tlenem prędkości oraz ciśnienia towarzyszące detonacji znacznie się zwiększały, a zmniejszała się jednocześnie droga rozbicia aglomeracji pyłowych oraz czas opóźnienia zapłonu. Ponadto stwierdzono, że zakres spalania detonacyjnego dla mieszanin pyłów owsa i pszenicy z powietrzem jest bardzo wąski. W przypadku pyłu owsa z powietrzem detonacja była możliwa jedynie w zakresie stężeń pyłu od 0,22 do 0,275 kg/m³, podczas gdy dla pyłu pszenicy zakres ten wynosi od 0,25 do 0,305 kg/m³. Dla obydwu mieszanin pyłowo-powietrznych prędkości detonacji wynoszą ok. 1500 m/s. W mieszaninach tych pyłów wzbogaconych w tlen zarówno zakresy granic detonacji, jak i prędkości detonacji zwiększają się.

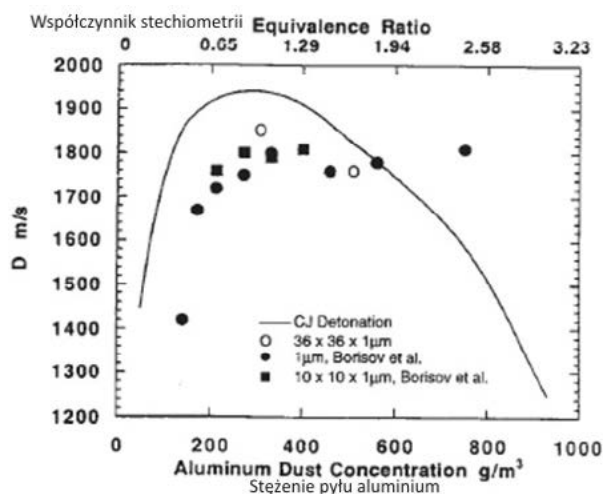
Interesujące badania w zakresie detonacji mieszanin pyłowo-powietrznych przeprowadził Lebecki i jego współpracownicy [20],[21]. Wykonano eksperymenty dotyczące propagacji wybuchu pyłu w galerii podziemnej o długości 400 m i przekroju o powierzchni 7,5 m² dla mieszanin pyłu zboża z powietrzem. Jako źródło zapłonu w badaniach wykorzystano lokalny wybuch stechiometrycznej mieszaniny metanowo-powietrznej przy objętości 25 m³ na początku galerii. Testowane mieszaniny pyłowo-powietrzne miały stężenia równe 100, 150 i 200 g/m³. W przypadku mieszaniny pyłu zboża z powietrzem o stężeniu 200 g/m³ odnotowano przejście do detonacji w odległości ok. 200 m od źródła zapłonu. Zmierzona prędkość fali detonacyjnej wynosiła 2000 m/s. Wiele lat pracy nad badaniami detonacji mieszanin pyłowo-powietrznych poświęcono zachowaniu się pyłu aluminium. W literaturze przedmiotu [4],[5] znajdują się analizy dotyczące badań detonacji pyłu aluminium przy użyciu zapłonu o dużej energii w rurach o małych średnicach i długościach. Wyniki rozkładu prędkości fali detonacyjnej charakteryzują się znacznym rozrzutem. Spowodowane jest to zastosowaniem cząstek pyłu aluminium o zróżnicowanej geometrii i wymiarach. W innych badaniach Borisov [4] zastosował dwa rodzaje pyłu aluminium, w kształcie kulek o średnicy 1 μm i płatków o wymiarach 10 x 10 x 1 μm. W tym przypadku obserwowano zbieżność w zakresach prędkości fali detonacji w badanej rurze o średnicy wewnętrznej 0,122 m i długości 4,2 m (stosunek długości do średnicy wynosi 34), przy zastosowaniu silnego źródła inicjacji detonacji. Jego badania wskazują, że znaczny wpływ na prędkość detonacji pyłu aluminium mają wymiary i kształt cząstek pyłu. Do obserwacji zjawiska przejścia od spalania deflagacyjnego do detonacji i sa-



Ryc. 4. Fotografia smugowa zjawiska detonacji w mieszaninie pyłu owsa z powietrzem. Zmierzona prędkość detonacji to 1450 m/s, przy stężeniu pyłu w mieszaninie 275 g/m³. Maksymalne ciśnienie fali uderzeniowej to 2,6 MPa. a) przebiegi ciśnienia w trzech punktach pomiarowych wzdłuż rury, b) przebieg ciśnienia na podstawie drugiego czujnika pomiarowego [19]

Fig. 4. Shadowgraph image of detonation phenomenon in dust-air mixture. Detonation velocity was recorded as 1450 m/s at dust concentration of 275 g/m³. Maximum shock wave pressure was 2,6 MPa, a) pressure profiles in three measuring points along the tube, b) pressure profile from the second gauge [19]

kompresji, wzmocniona przez energię wywiązaną przez tworzącą się falę płomienia, określa się w przedziale odległości $50 < x/d < 105$. Podobne zachowanie zaobserwowane zostało w mieszaninie pyłu kukurydzianego z tlenem przy ciśnieniu początkowym 1 bar o średnicy rury 0,14 m. W badanych procesach DDT, w mieszaninach pyłu aluminium z powietrzem, pierwsza fala kompresji rozwija się łagodnie w falę ciśnienia będącą prekursorem dalszych reakcji, powodowanych poprzez wolno przyspieszaną falę płomienia (prędkość ok. 230 m/s) na odcinku ok. 10 m. Następnie, gdy fala utworzy stabilną drugą falę kompresji, to będzie ona stale przyspieszana poprzez front płomienia. Spowoduje to utworzenie tzw. drugiej fali kompresji, której prędkość propagacji osiągnie krytyczną Liczbę Macha dla danego ośrodka. Doprowadzi to do sytuacji, w której wystąpi zjawisko tzw. detonacji stabilnej na końcowych odcinkach rury. Wyniki tych eksperymentów [11] w zakresie prędkości detonacji pyłu aluminium przedstawiono na rycinie 8.

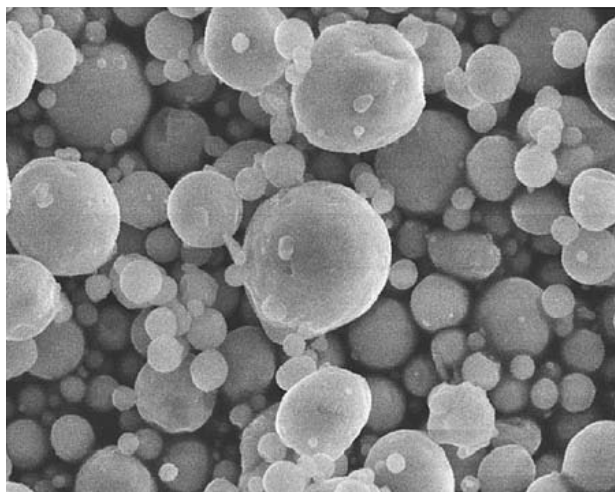


Ryc. 8. DDT pyłu aluminium w mieszaninie z powietrzem przy początkowym ciśnieniu 1 bar [22]

Fig. 8. DDT in aluminium-air mixture at initial pressure of 1 bar [22]

Zhang i Grönig [22] prowadzili swoje badania doświadczalne w zakresie ujednoczonych rozmiarów pojedynczych cząstek pyłu aluminium. Dla określonych rozmiarów cząstek, prędkości detonacji były zbliżone. Świadczyć to może o tym, że zjawisko detonacji jest ściśle związane z wielkością cząstek pyłu. Dalsze badania tego zjawiska wykazują, że poniżej pewnego granicznego wymiaru cząsteczek pyłu parametrem fizycznym warunkującym prędkość detonacji jest ciepło spalania aluminium. Z kolei Gelfand i inni [23] przeprowadzili badania eksperymentalne w zakresie określenia minimalnej krytycznej średnicy rury niezbędnej do propagacji detonacji w mieszaninach pyłu aluminium z powietrzem. Dla badanych zakresów aluminium odnotowali oni wartość w zakresie 0,04-0,055 m jako minimalną krytyczną średnicę rury. Do tej pory istnieje jednak duży brak wiedzy w zakresie tego parametru dla pozostałych mieszanin pyłowo-powietrznych. Tulis i inni [24] zbadali doświadczalnie strukturę komórkową fali detonacyjnej dla mieszanin pyłu aluminium z powietrzem. Określono wówczas, że rozmiar cząstek pyłu oraz ich kształt ma znaczący wpływ

na rozmiar komórki detonacji. Podobne prace przeprowadził również Zhang i inni [25], w których zbadano doświadczalnie wpływ ciśnienia początkowego na komórkową strukturę fali detonacyjnej dla mieszanin pyłu aluminium z powietrzem w rurze o długości 13 m i średnicy 80 mm. W celu zbadania wpływu rozmiaru cząstek pyłu aluminium na parametry detonacji wykorzystano w tych badaniach specjalny mikromierz wraz z oprzyrządowaniem cyfrowym. Na rycinie 9 przedstawiono mikrometryczną fotografię cyfrową cząstek pyłu aluminium o średnicy ok. 2 µm.



Ryc. 9. Mikrometryczne fotografie cząstek pyłu aluminium o średnicy ok. 2 µm [25]

Fig. 9. Micrometric image of aluminium dust particles with diameter about 2 µm [25]

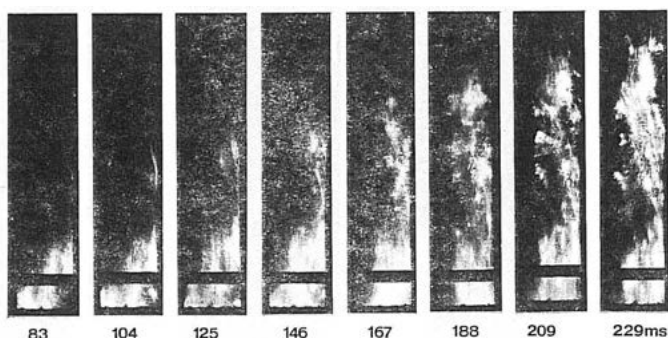
Zhang i Grönig [22] odkryli również, że dla mieszaniny pyłu skrobi kukurydzianej z tlenem, przy stężeniu paliwa 440 g/m³, średnia szerokość komórki detonacji wyniosła ok. 0,5 m, a jej długość ok. 0,77 m. Zmierzona podczas tych badań prędkość detonacji wyniosła 1895 m/s. Na podstawie tych badań stwierdzono ponadto, że w przypadku detonacji mieszanin pyłu skrobi kukurydzianej z powietrzem krytyczna średnica rury wynosi 0,1 m. Na rycinie 10 przedstawiono fotografię z zarejestrowaną strukturą komórkową fali detonacyjnej dla mieszaniny pyłu skrobi kukurydzianej z tlenem.



Ryc. 10. Fotografia struktury komórkowej fali detonacyjnej dla mieszaniny pyłu skrobi kukurydzianej z tlenem o stężeniu 440 g/m³ [22]

Fig. 10. Cellular structure of detonation wave in cornstarch and oxygen mixture at concentration of 440 g/m³ [22]

Klemens [21] przeprowadził interesujące badania doświadczalne w zakresie mechanizmu propagacji płomienia w mieszaninach pyłowo-powietrznych. Eksperymenty przeprowadzono dla mieszanin pyłu zboża z powietrzem w pionowym kanale o długości 1,2 m z jednym końcem otwartym. W górnej części kanału zamontowano dwa okna wziernikowe o wymiarach 0,08 x 0,08 m. Podczas badań rejestrowano prędkość propagacji fali, strukturę płomienia oraz temperaturę. Podczas tych badań zaobserwowano, że proces propagacji płomienia w mieszaninach pyłowo-powietrznych jest zbliżony do gazów. Zauważono, że wartość temperatury w strefie spalania zmienia się, osiągając różnicę o wartości nawet do 1000 K. Takie różnice temperatur w płomieniu są zazwyczaj charakterystyczne dla spalania turbulenta. Zauważono, że w przypadku płomieni pyłowych fluktuacje temperatury są bardziej intensywne w pobliżu ścianek kanału. Pomiar temperatury na froncie płomienia może posłużyć do szacowania grubości frontu płomienia, która w odniesieniu do mieszanin pyłowych jest około pięć razy większa, niż w przypadku gazów. Na rycinie 11 pokazano fotografie smugowe obrazujące front płomienia podczas spalania mieszaniny pyłu owsa z powietrzem o stężeniu paliwa 300 g/m^3 .



Ryc. 11. Fotografia smugowa frontu płomienia podczas spalania mieszaniny pyłu owsa z powietrzem, o stężeniu paliwa 300 g/m^3 [21]

Fig. 11. Shadowgraph image of the flame front in oat-air mixture at fuel concentration of 300 g/m^3 [21]

Klemens i inni [26] przeprowadzili również interesujące badania eksperymentalne w zakresie detonacji mieszanin pyłów organicznych w obecności substancji inertyzujących. Testów dokonano w pionowej rurze detonacyjnej o średnicy wewnętrznej 80 mm i długości 4500 mm. Proces propagacji płomienia monitorowano za pomocą fotografii smugowej, a poza tym mierzono ciśnienie oraz temperaturę na froncie płomienia. W ostatnich latach interesującą pracę doświadczalną w zakresie przejścia do detonacji w mieszaninach pyłu aluminium zainicjowanej od słabego źródła zapłonu przeprowadzili Liu i inni [27], wykorzystując do tego poziomą rurę o długości 29,6 m i średnicy 199 mm. Zastosowane do badań źródło zapłonu w postaci iskry elektrycznej miało energię równą 40 J, a podczas testów obserwowano przyspieszanie płomienia w mieszaninie aluminium z powietrzem, przejście do detonacji i w konsekwencji komórkową strukturę fali detonacyjnej. Zmierzone prędkości fali detonacyjnej były

w zakresie od 1480 m/s do 1820 m/s, a ciśnienia detonacji oscylowały pomiędzy 40 bar a 102 bar.

3. Podsumowanie i wnioski

Pomimo że badania detonacji w mieszaninach pyłowych prowadzone są już od wielu lat przez czołowe ośrodki naukowe na świecie, to w dalszym ciągu istnieje potrzeba poznania podstawowych parametrów oraz zależności mających wpływ na to zjawisko. Szczególnie istotne z praktycznego punktu widzenia bezpieczeństwa w przemyśle wydaje się być opracowanie bazy danych o parametrach detonacji w mieszaninach pyłowych, takich jak przede wszystkim szerokość komórki detonacji, granice detonacji, prędkości detonacji, odległości rozbiegowe do DDT, jak również krytyczny rozmiar cząstek pyłu, w których możliwe byłoby przejście od spalania deflagacyjnego do detonacji w mieszaninach pyłowych. Obliczenia prędkości detonacji oraz towarzyszącego ciśnienia fali uderzeniowej wydają się być skomplikowanym problemem naukowym, w przeciwieństwie do stosunkowo prostych modeli CJ i ZND dla mieszanin gazowych. Rozwiązanie opisanych w tym artykule problemów badawczych stanowić będzie zapewne wyznacznik dalszych prac naukowych w zakresie zjawiska detonacji w mieszaninach pyłowych. Ważnym również elementem tych badań będzie opracowanie oraz zwalidowanie kodu numerycznego umożliwiającego symulacje skutków wybuchów pyłowych, w tym detonacji, w warunkach przemysłowych na potrzeby doboru odpowiednich systemów zabezpieczeń przed wybuchem.

Publikacja powstała w ramach realizacji projektu rozwojowego DOBR-BIO4/052/13073/2013 pt. „Innowacyjne technologie zabezpieczeń przed wybuchem, w tym obiektów szczególnie chronionych”, finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Literatura

1. Law C.K., *Combustion physics*, Cambridge University Press, Cambridge 2006.
2. Lee J.H.S., *The detonation phenomenon*, Cambridge University Press, Cambridge 2008.
3. Nettleton M.A., *Gaseous detonations: their nature, effects and control*, Chapman and Hall Ltd., London 1987.
4. Mannan S. (red.), *Lee's Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 2, Third Edition, Elsevier, Oxford, UK 2005.
5. Eckhoff R.K., *Dust explosion in the process industries*, Gulf Professional Publishing, Boston 2003.
6. Babrauskas V., *Ignition handbook*, SFPE, 2003.
7. Lee J.H.S., Zhang F., Knystautas R., *Propagation mechanisms of combustion waves in dust-air mixtures*, „Powder Technology”, Vol. 71, Issue 2, 1992, pp. 153-162.
8. Proust Ch., *Dust explosions in pipes: an overview*, „Journal of Loss Prevention in the Process Industries”, Vol. 9, Issue 4, 1996, pp. 267-277.
9. Kauffman C.W., Wolański P., Arisoy A., *Dust, hybrid and dusty detonations*, [w:] *Dynamics of Shock Waves, Explosions, and Detonations. Progress in Astronautics and Aeronautics*, R. I. Soloukhin; A. K. Oppenheim; N. Manson; J. R. Bowen (red.), New York 1985.
10. Gardner B.R., Winter R.J., and Moore M.J., *Explosion Development and deflagration-to-detonation transition in coal dust/air suspensions*, „Proceedings of 21 International Symposium on Combustion”, Volume 21, Issue 1, pp. 335-343, 1988.

11. Shepherd J.E., Lee J.H.S., *On the transition from deflagration to detonation*, [w:] *Major Research Topics in Combustion*, M. Y. Hussaini, A. Kumar, R. G. Voigt (red.), Springer, New York 1992, 439-487.
12. Wolański P., *Deflagration and detonation combustion of dust mixtures*, [w:] *Dynamics of Deflagrations and Reactive Systems: Heterogeneous Combustion. Progress in Astronautics and Aeronautics*, A. A. Borisov, A. L. Kuhl, W. A. Sirignano, J. C. Leyer (red.), Vol. 132, New York 1991, 3-31.
13. Greenwald H.P., Wheeler R.V., *Coal dust explosions – The effect of release of pressure on their development*, „Safety in Mines Research Board”, Paper no. 14, 1925, pp. 3-12.
14. Cybulski W., *Explosibility of coal dust of very high fineness*, [w:] *Proceedings of 7 International Conference of Directors of Safety of Mines Research*, H.F. Coward (red.), Dortmund 1952.
15. Wolański P., Lee D., Sichel M., *The structure of dust detonations*, [w:] *Dynamics of Shock Waves, Explosions, and Detonations. Progress in Astronautics and Aeronautics*, R. I. Soloukhin; A. K. Oppenheim; N. Manson; J. R. Bowen (red.), Vol. 94, New York 1985, 241-263.
16. Kulikovskii V.A., *Existence of convergent Chapman-Jouguet detonation waves in dust-laden gas*, „Combustion, Explosion and Shock Waves”, Vol. 23, Issue 1, 1987, pp. 31-36.
17. Zhang F., *Phänomene von Wellen in Medien, Part II: Stabile Detonationen in einer Zweiphasenstromung aus reaktiven Teilchen und Gas*, Rozprawa doktorska, Technical University of Aachen, Germany 1989.
18. Wójcicki S., Teodorczyk A., *Detonacja mieszaniny pyłowo-powietrznej*, Pierwsza Krajowa Szkoła Wybuchowości Pyłów Przemysłowych, Karpacz 1978.
19. Kauffman C.W., Nicholls J.A., Wolański P., *Detonacja w mieszaninach pyłowo-powietrznych*, Druga Krajowa Szkoła Wybuchowości Pyłów Przemysłowych, Częstochowa 1980.
20. Lebecki K., *Zagrożenia pyłowe w górnictwie*, Główny Instytut Górnictwa, Katowice 2004.
21. Wolański P. (red.), *Grain dust explosion and control – Final report*, Project no. PL-ARS-135, Warszawa 1993.
22. Zhang F., Grönig H., *DDT and detonation waves in dust-air mixtures*, „Shock Waves”, Vol. 11, Issue 1, 2001, pp. 53-71.
23. Gelfand B.S., Medvedev A., Polenov A., Bartenev A., *Shock waves from expansion of burning dust clouds*, „Combustion, Explosion and Shock Waves”, Vol. 26, Issue 3, 1990, pp. 329-334.
24. Tulis A.J., Sumida W.K., Heberlein D.C., *Detonation tube studies of particle size and RDX sensitization of aluminium powder-air with regard to spinning and/or multiple front detonations*, [w:] *Proceedings of the Fifth International Colloquium on Dust Explosions*, Wolański P. (red.), Oficyna Wydawn. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1993.
25. Zhang F., Murray S.B., Gerrard K.B., *Aluminum particles-air detonation at elevated pressures*, „Shock Waves”, Vol. 15, Issue 5, 2006, pp. 313-324.
26. Klemens R., Kapuściński M., Woliński M., Wolański P., Sichel M., *Investigation of organic dust detonation in the presence of chemically inert particles*, „Combustion and Flame”, Vol. 99, Issues 3-4, 1994, pp. 742-748.
27. Liu Q., Li X., Bai C., *Deflagration to detonation transition in aluminum dust-air mixture under weak ignition condition*, „Combustion and Flame”, Vol. 156, Issue 4, 2009, pp. 914-921.
28. Liu Q., Bai C., Jiang L., Dai W., *Deflagration to detonation transition in nitromethane mist-aluminum dust-air mixture*, „Combustion and Flame”, Vol. 157, Issue 1, 2010, pp. 106-117.

dr inż. Rafał Porowski – absolwent Szkoły Głównej Służby Pożarnej w Warszawie. W roku 2010 ukończył studia doktoranckie na Wydziale Mechanicznym, Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej. Temat rozprawy doktorskiej dotyczył badań doświadczalnych i symulacji numerycznych przejścia do detonacji w mieszaninach gazowych. W latach 2009-2010 w ramach stypendium Fulbrighta pracował w California Institute of Technology, gdzie w Explosion Dynamics Laboratory zajmował się badaniami doświadczalnymi propagacji fal uderzeniowych oraz detonacji w mieszaninach heterogenicznych. Obecnie pracuje w Zespole Laboratoriów Procesów Spalania i Wybuchowości w CNBOP-PIB w Józefowie.