

dr inż. Rafał Porowski

inż. Dorota Zieziula

Wydział Mechaniczny, Energetyki i Lotnictwa

Politechnika Warszawska

Aktywne metody tłumienia detonacji w mieszaninach gazowych

Abstrakt

W artykule przedstawiono przegląd aktywnych metod tłumienia detonacji w mieszaninach gazowych. Opisane w nim zostały metody tłumienia detonacji za pomocą gazu, proszków gaśniczych oraz mgły wodnej. Pomimo znacznej poprawy w zakresie zarządzania i eksploatacji urządzeń, które przetwarzają substancje palne, wciąż istnieje potrzeba stworzenia innowacyjnych metod i środków ochrony przeciwwybuchowej. Podstawowym celem tych urządzeń jest ograniczanie potencjalnych skutków występowania zdarzeń, które mogą wywołać eksplozję. Czynnikiem, które mogą się przyczyniać do zmniejszenia skutków wybuchu, są między innymi minimalizacja wystąpienia uszkodzeń i wycieków, ulepszona konstrukcja oraz poprawa procedur operacyjnych i zarządzania bezpieczeństwem w warunkach przemysłowych.

Słowa kluczowe: detonacja, tłumienie, mgła wodna, proszek gaśniczy, gaz obojętny

Active Methods of Detonation Suppression in Gaseous Mixtures

Abstract

Paper presents the overview of the active methods of detonation suppression processes in reactive gaseous mixtures. In this paper the influence of the inert gas zone, dry powder and water mist on explosion processes was investigated. It was based on the literature review. Despite the significant improvements in the management and service of installations which process the materials of an explosive nature, there is still a need to create the innovative methods and measures to ensure the proper level of explosion safety. The primary purpose of such devices is to minimize the

incidence of events that could potentially cause an explosion. The elements, that may contribute to reduce the effect of explosion are among others, the mitigation of explosions damages and flammable substance leaks as well as operating procedures and safety management in industrial applications.

Keywords: detonation, suppression, water mist, dry powder, inert gas

Wprowadzenie

Nie można całkowicie wyeliminować niebezpieczeństwa wybuchu w zakładach przemysłowych, jednak ze względu na coraz szersze zastosowanie substancji o właściwościach palnych oraz wybuchowych, ciągle prowadzone są badania nad nowymi, bardziej skutecznymi metodami zmniejszenia zagrożenia wybuchowego lub działaniami, które zmniejszają skutki niekontrolowanego wybuchu. Biorąc pod uwagę samo zagrożenie wybuchem, zjawisko to zasadniczo dzieli się na deflagrację i detonację. Metody mające na celu zmniejszenie szans wystąpienia zjawiska detonacji to między innymi inertyzacja poprzez dodanie niepalnego pyłu, zmniejszenie stężenia tlenu lub dodatek gazu obojętnego. Ta ostatnia jest często wykorzystywana do zabezpieczenia instalacji przemysłowych, w tym transportu gazów palnych za pomocą gazociągów. Jeśli stężenie tlenu w mieszance palnej zostanie zmniejszone, to energia niezbędna do zapłonu takiej mieszaniny będzie musiała być wyższa. Użycie gazu obojętnego zamiast tlenu jest wykorzystywane np. w silosach, gdzie istnieje zasadniczo zagrożenie wybuchem pyłów palnych. Użycie niepalnego pyłu znalazło zastosowanie w kopalniach węgla kamiennego. Posypywanie osiadłego na chodnikach pyłu zmniejsza szanse wystąpienia wybuchu. Zapobieganie detonacji można również przez niedopuszczenie do powstania stężenia wybuchowego czy eliminację efektywnych źródeł zapłonu. Mieszanina, której skład znajduje się poza stężeniowymi granicami palności, nie stwarza zagrożenia wybuchem, dla pyłów niebezpieczeństwo to nie występuje poniżej dolnej granicy wybuchowości (DGW).

Aby stłumić wybuch, należy zahamować jego rozwój we wczesnym stadium poprzez szybkie podanie środka gaśniczego w strefę płomienia. Ponieważ początkowa faza rozwoju wybuchu jest krótka i wynosi około 30–100 ms, tłumienie odbywa się za pomocą automatycznego systemu tłumienia wybuchu.

1. Zastosowanie gazów obojętnych

Niestety wiele instalacji przemysłowych, w których stosowane są substancje palne, nie jest skonstruowana w taki sposób, aby wytrzymać wystąpienie zjawiska detonacji, z uwagi na fakt, że jest to zbyt drogie. Dlatego jedynym sposobem, aby zapobiegać poważnym uszkodzeniom i narażaniu życia ludzi jest nie dopuszczenie do powstania detonacji lub stłumienie jej podczas propagacji. W przypadku rury, w której znajduje się mieszanka paliwowo-powietrzna, przypadkowe zainicjowanie zapłonu prowadzi do powstania fali detonacyjnej, jednak wtrysnięcie odpowiedniego gazu obojętnego może powstrzymać detonację i pozwolić uniknąć katastrofy. Podobne środki bezpieczeństwa stosowane są w produkcji paliwowej.

Sposób tłumienia niekontrolowanej detonacji przy wykorzystaniu cząsteczek obojętnych okazał się skuteczny do kontrolowania i modyfikowania procesów spalania oraz detonacji w transportowych instalacjach gazowych. Sposób ten może być wykorzystywany w celu zmniejszenia prędkości detonacji czy skrócenia strefy reakcji.

Laffitte oraz Bouchet [1] badali tłumienie detonacji w mieszaninie metanu z tlenem oraz propanu z tlenem. Eksperymenty przeprowadzone zostały dla różnych składów mieszanin, jak również różnych mas ładunku cząstek obojętnych. W wyniku przeprowadzonych badań otrzymali oni minimalną wartość masy i całkowitej powierzchni cząstek obojętnych koniecznych do stłumienia fali detonacyjnej. Jak zaobserwowano w trakcie doświadczeń, sprawność tłumienia fali detonacyjnej obojętymi cząstkami wzrasta wraz ze wzrostem stężenia cząstek i zmniejszaniem się ich rozmiarów oraz gęstości. Wpływ takich właściwości cząstek obojętnych, jak pojemność cieplna, temperatura czy też wpływ początkowych parametrów mieszaniny na proces tłumienia detonacji nie był badany w większości przypadków.

Kolejne eksperymenty opisujące to zagadnienie zostały wykonane przez Teodorczyka i Benoana [3], którzy badali wpływ cząstek obojętnych na detonację. Eksperymenty zostały przeprowadzone w rurze detonacyjnej o przekroju kwadratowym 60×60 mm i długości 3,6 m. Jedna ze ścian kanału wykonana została z pleksiglasu o grubości 30 mm, aby umożliwić obserwację przeprowadzanego eksperymentu. Rura detonacyjna została wypełniona stechiometryczną mieszaniną wodoru i tlenu pod ciśnieniem 0,3 lub 0,5 bar. Obszar wpuszczenia gazu obojętnego znajdował się w środku kanału. Gaz

obojętny był dostarczany około sekundę przed zapłonem poprzez otwarcie zaworu elektromagnetycznego. Wielkość strefy objętej przez gaz obojętny był warunkowany przez wysokość ciśnienia gazu w zbiorniku. Fala detonacyjna powstawała na początku kanału detonacyjnego przez wysoką energię iskry zapłonu i zastosowanie spirali Schelkina [3]. Z przeprowadzonych prób wynikało, że najkrótszy czas rozpylenia gazu obojętnego miał He, ze względu na najmniejszą masę cząsteczkową. Badania przeprowadzone zostały dla różnych wartości ciśnienia w zbiorniku z gazem obojętnym. W badaniach wykorzystane były: Ar, He, N₂, CO₂. Objętość, jaką wypełni gaz obojętny, była kontrolowana przez ciśnienie gazu. Próby wykazały, że przy niskim ciśnieniu wtrysku N₂, CO₂ i Ar dawały niewielki spadek prędkości fali detonacyjnej, a jej parametry szybko powracały do początkowych. Dla wyższych ciśnień fala była początkowo tłumiona, po czym mieszanka zapalała się ponownie poprzez oddziaływanie fali uderzeniowej, a w konsekwencji pojawiała się zjawisko przejścia do detonacji. Dla He zaobserwowano różne zachowania fali detonacyjnej. Przy niskich ciśnieniach wtrysku nastąpił wzrost prędkości fali detonacyjnej spowodowany zmiennością składu mieszaniny. Dla wyższych ciśnień wtrysku, a co za tym idzie większej strefy gazu obojętnego, wystąpiło tłumienie, a następnie ponowny wybuch płomienia oraz przejście do detonacji. Najlepsze właściwości tłumiące przy zmiennym ciśnieniu wtrysku wykazał N₂.

Przeprowadzone badania pokazały, że skuteczność tłumienia detonacji gazem obojętnym jest proporcjonalna do jego masy cząsteczkowej. Przewidywania jakościowe modelu okazały się być zgodne z przeprowadzonymi eksperymentami. Jednak model jakościowy nie zawiera szczegółowej kinetyki chemicznej oraz zjawisk wielowymiarowych, jak turbulencja i wzrost warstwy przyściennej, które odgrywają bardzo ważną rolę w badaniach ilościowych detonacji i przejścia do detonacji w mieszaninach gazowych. Model teoretyczny wykazał, że ponowne przejście do detonacji jest zależne od stężenia gazu obojętnego na granicy faz. Gładka, stopniowa zmiana stężenia gazu obojętnego zmniejsza dystans przejścia w porównaniu do intensywnej zmiany faz. Szerokość sfery objętej cząstkami gazu obojętnego jest kolejnym czynnikiem, który wpływa na szybkość przejścia do detonacji [3].

2. Zastosowanie proszków gaśniczych

Kolejną z metod aktywnego tłumienia detonacji w mieszaninach gazowych jest użycie proszków gaśniczych. Jest to jeden z głównych środków tłumiących w wielu gałęziach przemysłu. Gdy fala uderzeniowa lub front płomienia spowodowany przez eksplozję dotrze do rozpylonego w powietrzu proszku, duża ilość ciepła i pędu jest wchłaniana przez zawieszane cząstki, które mogą spowodować spadek temperatury poniżej temperatury adiabatycznej płomienia i prowadzić do ograniczenia zjawiska wybuchu. Cząstki hamujące muszą być takie, aby stworzyć zawiesinę zdolną do absorpcji dużej ilości ciepła. Mogą być one zarówno aktywne, jak i obojętne chemicznie, zależnie od sytuacji, w której będą wykorzystane [4].

W porównaniu z mgłą wodną proszki mają wiele zalet. Mają doskonałą skuteczność i stały się pierwszym wyborem dla systemów tłumienia w przemyśle. Wcześniejsze eksperymentalne oraz teoretyczne lub numeryczne badania nad efektami tłumienia suchymi proszkami pokazują, że zwiększenie obszaru obojętnych cząstek może zmniejszyć zagrożenie wystąpienia wybuchu. Opór, jaki stawiają cząsteczki, mają również znaczący wpływ na szybkość detonacji oraz energię inicjacji wybuchu.

Badania prowadzone przez Kauffmana oraz Wolańskiego [9] wykazały, że zmniejszenie rozmiaru ziarna lub zwiększenie koncentracji cząstek może hamować proces eksplozji całkowicie. Podobny eksperyment zaproponowali Dong, Fan, Xie i Ye [9]. Przeprowadzili oni badania eksperymentalne i numeryczne dla dużego kanału wypełnionego mieszaniną CH_4 , O_2 , i N_2 . Wyniki pomiarów pokazują że zwiększenie gęstości chmury (zwiększenie masy całkowitej cząsteczek na objętość przepływu) lub zmniejszenie średnicy cząsteczek obojętnych może prowadzić do tłumienia detonacji, co zgadza się z przeprowadzonymi przez nich obliczeniami.

Podobne eksperymenty opisali Chen, Baochun i Fan [10]. Przeprowadzili oni badania w rurze detonacyjnej dla pięciu typów suchych proszków użytych jako medium tłumiące detonację mieszanki wodorowo-powietrznej. Badania przeprowadzone zostały w rurze detonacyjnej o długości 5 mm oraz przekroju kołowym. W jej skład wchodziły dwa zestawy wtrysku powietrza o średnicach dysz 1 mm oraz odległościach między nimi – 10 mm. Układ wtrysku powietrza składał się ze zbiornika zawierającego medium pod

wysokim ciśnieniem, elektrozaworu i zaworu zwrotnego. Elektrozawór sterował wypuszczeniem powietrza pod wysokim ciśnieniem do rury detonacyjnej poprzez dysze. Suchy proszek, który miał stłumić propagującą detonację, był ułożony na dnie komory. Wraz z pojawieniem się wysokociśnieniowego przepływu powietrza wewnątrz rury został on poderwany oraz tym samym utworzył mieszaninę pyłowo-powietrzną. W celu monitorowania rozprzestrzeniania się fali uderzeniowej i rozkładu ciśnień w różnych miejscach rury detonacyjnej wykorzystano przetworniki piezoelektryczne. Aby uzyskać zadowalające efekty tłumienia detonacji, konieczne było utrzymanie proszku tłumiącego w zawieszeniu przed nadejściem fali. W związku z tym zastosowano opóźnienie czasowe pomiędzy zapłonem zapalnika oraz zadziałaniem zaworu elektromagnetycznego. Ten czas zawieszenia zależy od średnicy cząstek, ich gęstości i ciśnienia powietrza wtryskiwanego ze zbiornika. Eksperymenty przeprowadzone przez Chen, Fan i Xiaohai [10] wykazały, że czas zawieszenia badanych proszków wahał się od 350 ms do 450 ms. Dlatego wybrana do prób zwłoka czasowa wynosiła 150 ms, co oznacza, że zapalnik zadziałał 150 ms po tym, jak informacja o otwarciu dotarła do zaworów elektromagnetycznych. Zaprezentowane przez nich wyniki wskazują, że dwutlenek krzemu posiada najlepsze właściwości tłumiące, kolejny jest węgiel wapnia, następnie proszki do gaszenia pożarów grupy ABC, jak również boksyt. W swoich badaniach zaobserwowali również zależność między wielkością cząstek, a efektem tłumienia. Im mniejsze były cząstki pyłu, tym lepsze wykazywały właściwości tłumiące, odwrotny efekt dawała zmiana gęstości chmury. Ich badania wykazały również, że w przypadku cząstek aktywnych chemicznie i małej gęstości materiału ich wydajność w procesie tłumienia była większa. Dodatkowo Chen, Fan i Xiaohai [10] stwierdzili, że poniżej pewnej wartości gęstości chmury pyłu ($\rho_p \leq 600 \text{ g/m}^3$) nie zajdzie całkowite tłumienie detonacji nawet przy rozszerzonej strefie tłumienia.

3. Zastosowanie mgły wodnej

Metodą aktywnego tłumienia detonacji jest również rozpylenie mgły wodnej. Jest ona od dawna używana do łagodzenia pożarów oraz eksplozji. Wtryski wody są często stosowane ze względu na stosunkowo niski koszt utrzymania. Na podstawie licznych badań przeprowadzonych w tej dziedzinie odnotowa-

no znacznie niższe parametry wybuchu poprzez zastosowanie mgły wodnej. Taki efekt otrzymywany jest, ponieważ ogrzewanie oraz parowanie kropelek wody znacznie obniża temperaturę spalania i zmniejsza prędkość spalania mieszaniny, w związku z czym skutecznie łagodzi skutki wybuchu.

Przeprowadzone zostały liczne eksperymenty mające na celu określenie skuteczności systemu ochrony przed wybuchem wykorzystującego rozpylenie wody. Badania te były głównie skoncentrowane na gaszeniu wybuchów w kopalni. Jak wynika z osiągniętych wyników, sama mgła wodna nie może złagodzić płomienia, działanie łagodzące przypisuje się zwiększonej wymianie ciepła i masie przeniesionej w strefę spalania. Dla złagodzenia wybuchu krople muszą się rozpaść.

System całkowitego tłumienia wybuchu musi zapewniać nie tylko skuteczne pochłanianie energii cieplnej, lecz też energii kinetycznej związanej z detonacją. Badania przeprowadzone przez Thomasa [6] pokazały, że bariera wodna może być skutecznie stosowana do tłumienia detonacji gazowych. Jeśli dostępne były środki do szybkiego wytworzenia bariery wodnej w krótkim odcinku rury przed dotarciem fali detonacyjnej, to takie rozwiązanie mogło stanowić mechanizm obronny, który nie zakłóci normalnych warunków eksploatacji rury. Próby utworzenia bariery wodnej, która zadziała w czasie porównywalnym do czasu propagacji fali detonacyjnej zostały przeprowadzone w 1986 r. przez Moena [11], który użył małych ładunków wybuchowych do rozproszenia wody.

Ponadto, Thomas [6] przeprowadził eksperymenty mające na celu zbadanie tłumienia detonacji mgłą wodną o dużych kroplach, 200 i 10000 μm . Przyjął, że detonację udało się stłumić, jeśli prędkość fali detonacyjnej spadnie poniżej 10% wartości jej prędkości początkowej. Swoje badania przeprowadził przy użyciu mieszaniny acetylenowo-tlenowej oraz etanowo-tlenowej, rozcieńczonej azotem lub argonem. Głównym mechanizmem wymiany energii między detonacją, a mgłą wodną był rozumiany tak, że woda wtryskiwana jako strumień rozproszony jest przyspieszana oraz ogrzewana do warunków produktów detonacji, a następnie odparowywana. Krople o mniejszych rozmiarach były uważane za bardziej efektywne w tłumieniu detonacji ze względu na niższy czas odparowania.

Efekt tłumienia płomienia jest spowodowany głównie przez odebranie energii cieplnej poprzez odparowanie kropelek wody, co redukuje palność

mieszanki za sprawą wystąpienia pary wodnej i tym samym zmniejszenie stężenia tlenu. System tłumienia mgłą wodną w znacznym stopniu zależy od szybkości działania oraz rozmiaru kropelek, które muszą odparować w strefie spalania. Taki system tłumienia budzi szerokie zainteresowanie ze względu na niski koszt i przyjazność dla środowiska. Ważnym aspektem dla tłumienia detonacji mgłą wodną jest rozdrobienie kropelek wody pod wpływem fali uderzeniowej, które tworzą sferę rozrzedzenia zmniejszającą intensywność wybuchu. W celu otrzymania efektu łagodzenia wybuchu kropelki wody muszą być bardzo małe i odparować we froncie płomienia lub zostać wystawione na działanie sił hydrodynamicznych, które spowodują ich rozpad.

Modak [12] badał wpływ mgły wodnej na tłumienie płomienia laminarnego dla mieszanin $H_2 - CH_4 - C_3H_8$ z powietrzem. Wyniki pokazały, że poniżej pewnej wielkości kropelek wody ich dalsze zmniejszanie nie przynosi żadnych korzyści związanych z masą wykorzystanego medium pozwalającą osiągnąć efekt tłumienia. Symulacje obliczeniowe wykonane przez Modaka pokazują, że istnieje dolna granica wielkości kropelek wody, poniżej której charakterystyka tłumienia płomieni się nie poprawia dla tej samej ilości wody. Ten parametr został określony na poziomie $10 \mu m$ dla mieszanin metanowo-powietrznych i na $2 \mu m$ dla mieszanin wodorowo-powietrznych.

Chaumeix i inni [7] przeprowadzili badania dotyczące szczegółowego zbadania zachowania się płomienia mieszaniny wodorowo-powietrznej w obecności kropelek wody. Głównie badany był wpływ mgły wodnej na gwałtowność wybuchu, granice palności mieszaniny oraz ich zmiana w obecności mgły wodnej. Eksperymenty przeprowadzone zostały w naczyniu sferycznym o pojemności 56 l. Była ona wyposażona w cztery okna, dwie elektrody umieszczone wzdłuż średnicy kuli, piezoelektryczne przetworniki ciśnienia oraz dedykowany układ akwizycji danych. Wizualizację płomienia uzyskano dzięki metodzie Schlieren oraz zastosowaniu szybkiej kamery cyfrowej.

Przed każdym badaniem komora była odpowietrzana tak, aby ciśnienie było niższe niż 3 Pa. Użyte zostały dwa rodzaje mechanizmów wtryskujących zamontowanych na szczycie zbiornika, dysza typu mono-fluid i dysza typu bi-fluid. Rozmiar kropelek generowanych przez dysze wtryskowe charakteryzował współczynnik SMD (z ang. Sauter Mean Diameter). W przypadku dyszy mono-fluid współczynnik SMD kropelek był regulowany przez podniesienie ciśnienia wody, zmniejszał się od $60 \mu m$ dla 7 bar do $30 \mu m$ dla 50 bar. Przy

użyciu dyszy bi-fluid, gdzie woda była wtryskiwana wraz z gazem palnym ten współczynnik wahał się od 4 do 10 μm . Z przeprowadzonych badań wynika, że dla ubogiej mieszaniny istnieje stosunkowo duży zakres, w którym mieszanka jest niepalna. Obecność mgły wodnej w mieszaninie nie przesunie wartości LFL tak długo, jak gęstość mgły wodnej nie będzie przekraczała wartości krytycznej ($\text{SMD} = 50 \mu\text{m}$). Efekt tłumienia dla stosunkowo dużych rozmiarów kropeł ($\text{SMD} = 200\text{--}250 \mu\text{m}$) dla propagującego płomienia laminarnego w mieszaninie wodoru oraz tlenu nie miał dużego znaczenia, gdy prędkość płomienia była znacznie szybsza w porównaniu do prędkości kropeł. Jeśli ich prędkości były tego samego rzędu wielkości oraz poruszały się w tym samym kierunku nastąpiło sprzężenie między strefą spalania, a odparowania kropeł.

Inne przeprowadzone badania numeryczne, jak również doświadczalne skupiały się głównie na badaniu ewentualnego zapłonu gazu w kopalniach węgla i gaszeniu wybuchu mieszanki metanowo-powietrznej przy użyciu mgły wodnej (Sapko 1977 czy Lentati i Chelliah 1998 [12]). W ostatnich latach badania nad wpływem mgły wodnej na deflagrację w mieszaninie wodorowo-powietrznej przeprowadzone były w 2014 r. przez Cheikhavata. Wynika z nich, że obecność kropełek wody powoduje zmniejszenie szybkości narastania ciśnienia w obszarze całkowitego spalania. Jednakże w obszarach, gdzie spalanie nie było całkowite, zaobserwowane zostało zjawisko przeciwne.

Podobne badania wykonał Jons [12]. Przeprowadzone zostały dla mniejszego stężenia mieszaniny wodorowo-powietrznej, a dokładnie 7–8% H_2 . Pokazały, że mgła wody o średnicy kropli mniejszej niż 10 μm , wprowadzona przed zapłonem może skutecznie hamować wybuch. Nowsze badania przeprowadzone w 2015 r. przez Boeckea i innych [5] dla detonacji mieszanin wodorowych w kanale z przeszkodami wykazują, że mgła wodna o średnicy kropeł 13 μm opóźnia przejście propagującego płomienia w detonację, jednak dla mieszaniny bliskiej stechiometrycznej prędkość propagacji detonacji zmniejsza się tylko o 3%. Jednakże, należy pamiętać, że bariera wodna jest bardzo skutecznym mechanizmem tłumienia w przypadku zapłonu i wystąpienia przejścia do detonacji.

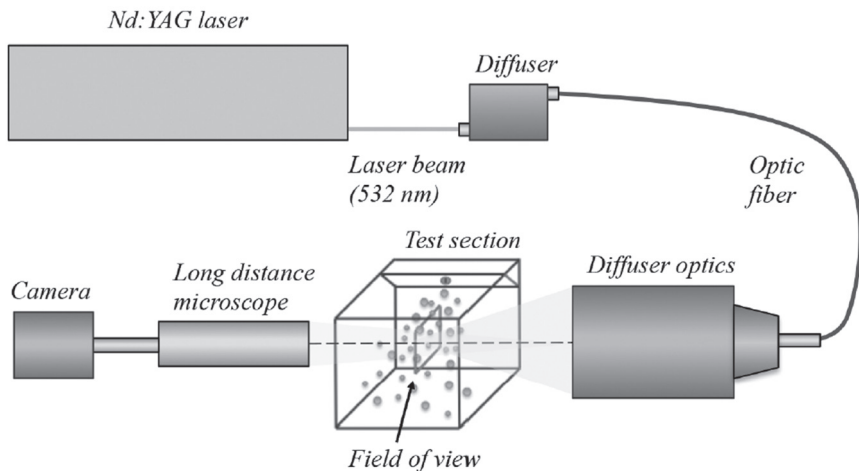
Parra i inni [8] przeprowadzili badania numeryczne i symulacje weryfikujące działanie mgły wodnej na silną deflagrację. Według przeprowadzonej przez nich symulacji propagacja płomienia odbywała się w rurze detonacyjnej

o długości 18 m i wysokości 1,5 m. W punkcie symulującym zapłon mieszanki zadana temperatura wynosiła 1800 K, z zamkniętej strony. Początkowe stężenie odpowiadało stechiometrycznej mieszance metanu w powietrzu. Bariera w postaci mgły wodnej miała krople o rozmiarze 50 μm oraz 0,05% objętości cieczy znajdowało się w odległości 3 m od punktu zapłonu. Otrzymane wyniki wskazują, że gdy płomień oddziałuje z barierą wodną to ciśnienie wzrasta wolniej niż dla spalania adiabatycznego. W związku z tym prędkość propagacji płomienia maleje. Obecność pary wodnej powoduje znaczną zmianę składu mieszaniny. Według założeń Chao i Law [12] można mówić o stłumieniu płomienia, gdy jego prędkość spalania spadnie poniżej 60% jej spalania adiabatycznego. Wykazali, że bariera wodna o rozmiarze kropeł mniejszy niż 100 μm może efektywnie złagodzić proces spalania, czyli spełnić postawiony warunek.

Inne doświadczenia wykazały, że proces tłumienia detonacji zależy również od regularności komórek detonacyjnych, przy regularnych komórkach występuje znacznie mniejsza szansa na wystąpienie DDT oraz znacznie łatwiejsze tłumienie. W 2015 roku opublikowane zostały wyniki badań przeprowadzonych przez Boeckea i innych [5] dotyczące tłumienia mgłą wodną przejścia do detonacji dla mieszanin wodorowo-powietrznych. Przeprowadzili oni badania w rurze detonacyjnej o długości 4,2 m i przekroju prostokątnym 0,06 \times 0,3 m. Do pomiaru parametrów przepływu wykorzystane zostały piezoelektryczne przetworniki ciśnienia zainstalowane w kanale płyty górnej. Rura detonacyjna była wyposażona w układ wtrysku wody na który składało się czternaście rozpylaczy ultradźwiękowych. Woda była dostarczana przez rurę doprowadzającą i transportowana do objętości wybuchu przez strumień powietrza. Badania zostały przeprowadzone w trzech seriach. Pierwsza z nich przebiegała bez wykorzystania mgły wodnej. Kolejna z wykorzystaniem wody i ostatnia przy użyciu 0,11–0,12 kg/m^3 wody. W każdej z prób stężenie H_2 wynosiło 12,6–19,2%. Zakres przeprowadzonych eksperymentów obejmuje powolne przejście płomienia do detonacji. Przeprowadzone próby miały na celu określenie dla jakiej objętości mgły wodnej może ona wpływać na eksplozję mieszanki wodorowo-powietrznej. Autorzy przeprowadzonego eksperymentu wykazali, że strumień wody o gęstości 0,11–0,12 kg/m^3 łagodzi detonację. Zmierzona redukcja ciśnienia odpowiadała zmniejszeniu stężenia H_2 o 0,6% przy gwałtownym spalaniu i 1–2% przy detonacji.

W latach 2015–2016 na Wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa (MEiL) Politechniki Warszawskiej przeprowadzone zostały badania, które miały na celu określenie wpływu wtrysniętych kropelek wody na propagującą detonację w mieszaninie wodorowo-powietrznej [1]. Badania przeprowadzono w rurze detonacyjnej o długości 5 m oraz przekroju kwadratowym przy różnorodnych warunkach początkowych, aby oszacować masę dostarczonej wody, konfigurację, ciśnienie wtrysku wody oraz rozmiar kropelek. Wyniki badań pokazały, że przy przejściu fali przez strumień wody o rozmiarze kropelek 215 μm prędkość fali detonacyjnej spada poniżej prędkości produktów detonacji wraz ze wzrostem wielkości kropelek oraz gęstości mgły wodnej. W większości przeprowadzonych prób mgła wodna o rozmiarze kropelek 215 μm była w stanie stłumić propagującą detonację jednak tylko tymczasowo, przepływ nagle przyspieszał do prędkości detonacji. Uznano, że to zjawisko wiąże się z krótkim czasem odparowania kropelek wody, jednakże przy wzroście gęstości mgły wodnej przepływ wykazywał tendencję do szybkiego zmniejszenia prędkości przy stosunkowo małej masie zużytego czynnika tłumiącego. Wykorzystanie dysz dających średnice kropelek wody o rozmiarze 500 μm pozwoliło na uzyskanie całkowitego wygaśnięcia detonacji.

Do określenia wielkości kropelek wody wtryskiwanych przez dwie dysze typu H-VV-005 i H-VV-01 użyto metodę cieniową (z ang. Shadowgraph), służącą do wizualizacji przepływów. Na rys. 1 przedstawiono zestaw wykorzystywany w badaniach doświadczalnych. Rozproszona wiązka laserowa o częstotliwości 10 Hz została umieszczona w sekcji testowej, gdzie badana dysza była zamontowana w ramie o wymiarach 110 mm \times 110 mm, naśladując konfigurację rzeczywistej rury detonacyjnej. Laser został zamocowany na kamerze cCMOS, a jego wiązka skupiona w płaszczyźnie osi wtryskiwacza prostopadłej do osi rury detonacyjnej. System rozpoznawania kropelek bazował na różnicach między intensywnością zapisanych cieni kropelek, a tłem. Cienie kropelek wody zlokalizowanych poza płaszczyznę ogniskowej miały mniejszą intensywność, co pozwoliło wykluczyć je z analizy [1]. Rozmiar kropelek wody był mierzony w przybliżeniu przez okres 4 s dla trzech różnych ciśnień. Długi czas wtrysku jest ważnym czynnikiem pod względem uzyskania średniej wielkości kropelek wody, dopuszczając również możliwość ewentualnego odbicia kropelek i ich kolizji [1].



Rys. 1. Schemat zestawu do określania wielkości kropli

Źródło: [1]

Kolejną dyszą wykorzystywaną podczas prób była dysza typu H-U-10, która według specyfikacji wystawionej przez producenta jest dyszą o dużym rozmiarze kropli, w przybliżeniu 500 μm dla ciśnienia wtrysnięcia 3,5 bar. Ważnym parametrem przyczyniającym się do zwiększenia efektywności tłumienia detonacji jest czas parowania kropli wody przed oddziaływaniem z detonacją. Czas parowania kropli wtrysniętej przez dyszę może być oszacowany przy użyciu równania opisującego parowanie kropelki cieczy (1):

$$d^2 = d_1^2 - K(t) \quad (1)$$

gdzie:

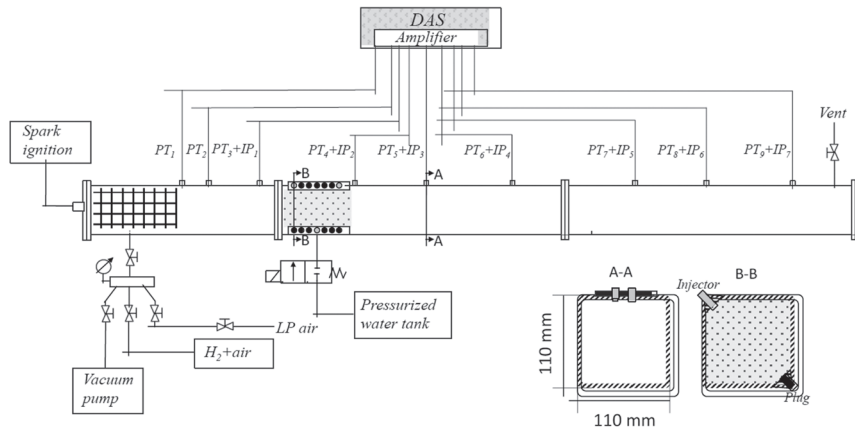
K – stała parowania,

d_1 – średnica początkowa kropli,

d – rozmiar kropli w czasie t .

Badania doświadczalne na Wydziale MEiL Politechniki Warszawskiej przeprowadzono w rurze detonacyjnej o długości 5 m i przekroju prostokątnym o wymiarach 110 mm \times 110 mm. Wyposażony w dziewięć piezoelektrycznych przetworników ciśnienia oraz siedem sond jonizacji połączonych z systemem gromadzenia danych przez wzmacniacze sygnału. Wzmocnienie

sygnału w pierwszym przetworniku ciśnienia rozpoczyna pomiar. Opóźnienie generatora jest wykorzystywane do zsynchronizowania zapłonu z wtryskiem wody i umożliwia zmianę czasu wtrysku. Każda z dysz jest bezpośrednio połączona z 2/2-drożnym zaworem elektromagnetycznym, który jest połączony ze zbiornikiem wody pod ciśnieniem.



Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego

Źródło: [1]

Badania doświadczalne rozpoczęto od opróżnienia rury detonacyjnej i napełnienia jej badaną mieszaniną, w tym przypadku była to mieszanina wodorowo-powietrzna. Po wystąpieniu zapłonu, płomień przyspieszał, a w konsekwencji nastąpiło zjawisko przejścia do detonacji za pomocą drobnej metalowej siatki. Stabilizacja detonacji następowała w odległości około 50 cm od miejsca zapłonu. Biorąc pod uwagę pożądaną wielkość kropeł wody oraz jej ilość, czas wprowadzenia wody do układu jest opóźniony w zależności od wystąpienia zapłonu. Jak widać na rys. 2 z każdej strony można zamontować siedem dysz wtryskujących wodę. Pierwsza z dysz była usytuowana w odległości 1,192 m od miejsca wystąpienia zapłonu. Dysze oddalone są od siebie na odległość 2 cm. W przeprowadzonych próbach, aby zbadać wpływ gęstości strumienia wody, testowane było dziewięć konfiguracji rozmieszczenia dysz. Stanowisko badawcze składało się z zapłonu iskrowego, siatki wspomagającej proces turbulizacji płomienia, zaworu doprowadzającego mieszaninę wodorowo-powietrzna, jak również pompy próżniowej. W środkowej części rury

detonacyjnej przy zbiorniku z wodą znajdował się rozdzielacz dwudrogowy, dwupołożeniowy, sterowany ciśnieniem, który doprowadza medium do systemu tłumiącego detonację. Każdy z przetworników ciśnieniowych połączony był z systemem gromadzenia danych. Na końcu rury detonacyjnej znajduje się zawór odprowadzający.

Podsumowanie

Obecnie na całym świecie prowadzonych jest szereg prac badawczych w zakresie aktywnych metod oraz systemów tłumienia detonacji w mieszaninach gazowych. Większość z tych badań to przede wszystkim badania doświadczalne, które wymagają dużych nakładów finansowych, jak również zaawansowanych metod pomiaru, chociażby pomiaru rozkładu bardzo małych kropelek wody. Badania numeryczne, które obecnie są prowadzone, to głównie badania skoncentrowane na poznaniu mechanizmu gaszenia fali detonacyjnej poprzez różne media, takie jak gazy obojętne, proszki gaśnicze czy też drobne kropelki wody w postaci mgły wodnej. Należy stwierdzić, że kierunkiem rozwoju aktywnych metod tłumienia detonacji w mieszaninach gazowych jest zastosowanie wysokociśnieniowej mgły wodnej, której wtrysk przed frontem propagującej fali detonacyjnej powodować będzie określone skutki tłumienia tego zjawiska. Jednakże, aby skonstruować wysokociśnieniową instalację do podawania mgły wodnej do propagującej fali detonacyjnej, należy jeszcze po drodze rozwiązać kilka istotnych problemów konstrukcyjnych, jak również zmierzyć się z ekonomią budowy takiej aparatury. Wyzwaniem może się tu okazać potrzeba takiej instalacji w elektrowniach jądrowych, gdzie zagrożenie wybuchem wodoru, a w niektórych okolicznościach powstanie spalania detonacyjnego stanowi realny scenariusz rozwoju zdarzeń.

Literatura

- [1] Niedzielska U., Kapusta Ł., Teodorczyk A., Influence of Water Droplets on Propagation Detonation, 11 International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions, Dalian, Chiny, 24–29.07.2016.

- [2] Chen Z., Fan B., Jiang X., Suppression effects of power suppressants on the explosions of oxyhydrogen gas, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries.*, vol. 9, 2006.
- [3] Teodorczyk A., Benoan F., Interaction of detonation with inert gas zone, *Shock Waves* no. 6, 1996.
- [4] Fedorov A.V., Tropin D.A., Bedarev I.A., Mathematical modeling of detonation suppression in a hydrogen-oxygen mixture by inert particles, *Combustion, Explosion and Shock Waves*, vol. 46, No. 3, 2010.
- [5] Boeck L.R., Kink A., Oezdin D., Hasslberger J., Sattelmayer T., Influence of water mist on flame acceleration, transition to detonation and detonation propagation in – air mixtures, 25 International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, Leeds, UK, 02–07.08.2015.
- [6] Thomas G.O., Edwards M.J., Edwards D.H., Studies of detonation quenching by water sprays, *Combustion Science and Technology*, vol. 71, 1990.
- [7] Chaumeix N., Cheikhvat H., Goulier J., Bentaib A., Meynet N., Pailard C., Effects of water sprays on flame propagation in hydrogen-air-steam mixtures, *Proceedings of the Combustion Institute*, 35, 2015.
- [8] Parra M.T., Castro F., Mendez C., Villafruela J.M., Mitigation of strong deflagration by water mist, 20 International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, Leeds, UK, 31.07–5.08.2005.
- [9] Wolański P., Liu J.C., Kauffmann C.W., Nicholls J.A., Sichel M., 1988. The effects of inert particles on methane-air detonations. *Archivum Combustionis*, 8, 1, 15–32.
- [10] Chen Z., Fan B., Xiaohai J., Suppression effects of powder suppressants on the explosions of oxyhydrogen gas, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 19, 2006.
- [11] Moen I.O., Transition to detonation in fuel-air explosive clouds, *Journal of Hazardous Materials*, 33, 1993.
- [12] Nettleton, M.A., *Gaseous detonations: their nature, effects and control*, Springer, 1987.