

Katedra Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej
Wydział Elektroniki
Politechnika Wroclawska

mgr inż. Damian Lewandowski

WYTWARZANIE AEROZOLU
WODNEGO METODĄ
WYBUCHOWĄ – ASPEKTY
METROLOGICZNE

– praca doktorska –

Promotor:
prof. dr hab. Roman Dygdała
prof. dr hab. inż. Janusz Mroczka

praca sfinansowana ze środków projektu badawczo-rozwojowego Nr R00-O0003/3

Wrocław 2010

SPIS TREŚCI

1.	WSTĘP.....	3
2.	KAPSUŁA WODNA I WYDAJNOŚĆ JEJ KONFIGURACJI.....	10
2.1	ZASTOSOWANIE AEROZOLU WODNEGO DO GASZENIA POŻARÓW	10
2.2	KONFIGURACJA KAPSUŁY WODNEJ.....	12
3.	ENERGIA EKSPLOZJI I JEJ ROZPROSZENIE	19
4.	RÓWNANIE RUCHU KROPEL AEROZOLU	28
5.	ZASIĘG AEROZOLU W FUNKCJI CZASU	33
6.	ANALIZA WYNIKÓW	41
6.1	POMIARY DOTYCZĄCE FALI UDERZENIOWEJ.....	48
6.2	POMIARY DOTYCZĄCE ROZPRZESTRZENIANIA SIĘ CHMURY AEROZOLU WODNEGO	54
6.3	POWSTAWANIE I ROZPRZESTRZENIANIE SIĘ CHMURY AEROZOLU WODNEGO PODCZAS ZRZUTU KAPSUŁY	86
6.4	PORÓWNANIE WYNIKÓW DLA FALI UDERZENIOWEJ I OBŁOKU AEROZOLU WODNEGO.....	91
6.5	POMIAR WIELKOŚCI KROPEL AEROZOLU WODNEGO	94
6.5.1	METODA OPADANIA	95
6.5.2	METODA OPTYCZNA WYKORZYSTUJĄCA REJESTRATOR KROPEL WODY.....	104
6.5.2.1	ANALIZA PRZY POMOCY TEORII DYFRAKCYJNEJ FRAUNHOFERA	111
6.5.2.2	WYKORZYSTANIE DO ANALIZY TEORII LORENZ-MIE	114
6.5.2.3	KOREKCA ROZKŁADÓW ŚREDNIC KROPEL WODY WYZNACZANYCH METODĄ MIKROSKOPOWĄ.....	117
6.5.2.4	WYNIKI POMIARU WIELKOŚCI KROPEL AEROZOLU	117
6.6	OSZACOWANIE WIELKOŚCI ENERGII ZUŻYTEJ NA FRAGMENTACJĘ WODY ZGROMADZONEJ W KAPSULE	133

SPIS TREŚCI

7. PODSUMOWANIE	135
ZAŁĄCZNIK NR 1: POŻARY LASÓW – PRZYCZYNY POWSTAWANIA, WYSTĘPOWANIE POŻARÓW	146
ZAŁĄCZNIK NR 2: WYZNACZENIE BŁĘDU POMIARU ŚREDNICY CHMURY AEROZOLU WODNEGO.....	156
ZAŁĄCZNIK NR 3: WYZNACZENIE BŁĘDU PRĘDKOŚCI CHWILOWEJ ROZPRZESTRZENIANIA SIĘ CHMURY AEROZOLU WODNEGO.....	165
ZAŁĄCZNIK NR 4: WYZNACZENIE PARAMETRÓW MIGAWKI REJESTRATORA KROPEL.....	167
ZAŁĄCZNIK NR 5: WYZNACZENIE PARAMETRÓW ROZKŁADU KROPEL AEROZOLU WODNEGO	173
BIBLIOGRAFIA.....	176

1. WSTĘP

Jednym ze sposobów wytwarzania aerozolu jest metoda wybuchowa. Polega ona na detonacji ładunku wybuchowego, który jest umieszczony w zbiorniku z medium aeroszowanym. W chwili detonacji powstają gazy i następuje proces fragmentacji medium aeroszowanego oraz ekspansja powstałych kropeł.

Idea wytwarzania aerozolu przy pomocy ładunku wybuchowego nie jest nowa. Przez pewien czas wojsko pracowało nad takim rozwiązaniem dążąc do wyprodukowania odpowiednio wydajnej bomby paliwowej [1, 2]. Prezentowany w pracy pomysł wytwarzania aerozolu wodnego jest bardzo podobny do metod stosowanych przez wojsko lecz nie może być on skopiowany z dwóch powodów. Pierwszym jest brak dokładnych danych z przeprowadzonych prób i doświadczeń, drugim natomiast są standardy bezpieczeństwa, jakim musi odpowiadać opracowana metoda. Standardy wojskowe są znacząco różne od cywilnych. Niektóre rezultaty wybuchowego produkowania aerozolu wodnego są dostępne [3, 4], lecz dotyczą one zastosowań stacjonarnych i ilości wody o dwa lub trzy rzędy wielkości mniejszych od tych jakie analizowane są w tej pracy.

Metoda produkcji aerozolu w sposób wybuchowy może być wykorzystywana m.in. do gaszenia ognia [5, 6]. To przeznaczenie jest wiodącym kierunkiem zastosowań i ma dominujący wpływ na wybór problematyki przedstawionej w tej rozprawie. Zastosowań jest znacznie więcej, a zapewne w chwili wdrożenia produkcyjnego danej metody i upowszechnienia pojawią się nowe zastosowania. Aerozol może być używany do dezaktywacji skażonych terenów, wykonywania oprysków czy nanoszenia środków bojowych. Użycie omawianej metody do tak różnych celów wymaga dobrania kapsuł oraz ładunków wybuchowych, które spełnią odpowiednie wymagania jak również medium, które będzie źródłem aerozolu.

Produkcja aerozolu wodnego metodą wybuchową wymaga m.in. opracowania prototypów pojemników z wodą (zwanych w pracy *kapsułami wodnymi*), dobrania rodzaju i wielkości ładunków wybuchowych, sposobu umieszczenia ich w kapsule wodnej, sposobu pobudzenia detonacji. Podstawowym celem jest wyprodukowanie aerozolu o odpowiedniej wielkości kropeł oraz doprowadzenia do pokrycia przez nie wymaganego obszaru. Jednym ze sposobów otrzymania mniejszych kropeł jest

obniżenie napięcia powierzchniowego wody poprzez dodanie różnego rodzaju domieszek.

Powstawanie i rozprzestrzenianie się aerozolu wodnego jest bardzo złożonym zagadnieniem. We wdrożeniu tej metody pojawia się szereg problemów, które należy rozwiązać. Głównymi z nich są:

- problem modelowania procesu powstawania i rozprzestrzeniania się chmury aerozolu wodnego,
- problem wprowadzenia odpowiednich parametrów do przeprowadzenia analizy teoretycznej procesów i zjawisk towarzyszących aerozolowaniu wybuchowemu,
- przeprowadzenie prób doświadczalnych, które pozwolą wyznaczyć drogą empiryczną parametry opisujące zjawisko aerozolowania wybuchowego.

Wśród procesów towarzyszących powstawaniu chmury aerozolu wodnego można wyszczególnić trzy podstawowe fazy. Pierwsza faza to detonacja w materiale wybuchowym i procesy zachodzące w nim. Podstawową wielkością charakteryzującą ten etap to prędkość detonacji materiału wybuchowego oraz ilość wyzwolonej energii (idealna praca wybuchu). Druga faza to proces wybuchowego wytwarzania aerozolu wodnego, pulweryzacja cieczy, proces napędzania aerozolu wodnego, powstawanie fali uderzeniowej po detonacji. Trzecia faza to proces ekspansji aerozolu wodnego. Proces ten pokrywa się częściowo z procesem napędzania aerozolu wodnego od momentu, gdy fala uderzeniowa "wyprzedzi" czoło aerosolu wodnego. Przedmiotem tej pracy są zjawiska, które mają miejsce w trzeciej z wymienionych faz.

STRUKTURA ROZPRAWY

W prezentowanej rozprawie doktorskiej przedstawiono prosty model opisujący skutki eksplozji materiału wybuchowego w otoczce wodnej od momentu wytworzenia aerozolu wodnego po całkowitym przereagowaniu materiału detonacyjnego. Analiza zjawisk fizycznych ma w tym przypadku wprowadzać jak najmniej parametrów. Pełny opis zjawiska aerozolowania wybuchowego jest niewątpliwie bardzo trudnym i złożonym zjawiskiem zwłaszcza dla czasu do około 1 ms licząc od momentu zakończenia spalania wybuchowego materiału detonacyjnego. Nie mniej jednak prezentowana publikacja odnosi się m.in. do bardzo ważnych zagadnień dotyczących

wytwarzania aerozolu wodnego, wprowadzenia odpowiednich parametrów modelowych, których wyznaczenie na drodze doświadczalnej daje w efekcie końcowym wystarczającą wiedzę na temat optymalizacji parametrów materiału wybuchowego, wielkości otoczki wodnej, wielkości kropeł aerozolu wodnego itp. Tak więc praca dotyczy następujących zagadnień:

- modelu wydajności konfiguracji ładunku wybuchowego umieszczonego w kapsule wodnej,
- oszacowania energii eksplozji i jej rozproszenia,
- wyprowadzenia równań ruchu kropeł aerozolu wodnego,
- pomiarów zasięgu aerozolu w funkcji czasu,
- pomiarów wielkości kropeł aerozolu wodnego.

Powstanie modelu danego zjawiska fizycznego może mieć charakter dedukcyjny lub indukcyjny [8]. Ze względu na złożoność zjawiska produkcji wybuchowej aerozolu wydaje się być nieosiągalne stworzenie modelu jedynie na zasadach dedukcyjnych. Zaprezentowany w rozprawie model fizyczny i matematyczny procesu rozprzestrzeniania się chmury aerozolu wodnego powstał na drodze indukcyjnej i dedukcyjnej. Stanowi on podstawę pewnej ogólnej hipotezy o danym zjawisku. Celem metrologii było tu przekształcenie modelu fizycznego i matematycznego w model metrologiczny, który możliwy jest do weryfikacji doświadczalnej. Między modelem fizycznym i metrologicznym występują nieodzowne interakcje w postaci sprzężeń zwrotnych, co jest zgodne z ogólnym schematem procesu poznawczego [8].

Rozmieszczenie ładunku wybuchowego w kapsule wodnej ma zasadnicze znaczenie na powstawanie, wielkość kropeł i kształt chmury aerozolu wodnego. Rozdział 2 poświęcony jest temu zagadnieniu. Przeanalizowane są tu dwie możliwości umieszczenia ładunku aerosolującego wewnątrz kapsuły wodnej: wzdłuż osi symetrii (konfiguracja cylindryczna – Rysunek 2.2) oraz w punkcie będącym środkiem symetrii (konfiguracja sferyczna – Rysunek 2.1).

Energia, uwolniona w chwili detonacji ładunku wybuchowego, zostaje zużyta min. na fragmentację wody zgromadzonej w kapsule, na przyspieszenie kropeł oraz wytworzenie fali uderzeniowej. W rozdziale 3 przedstawiono prosty model opisujący powstawanie aerozolu wodnego wytwarzanego wybuchowo. W oparciu o ten model przedyskutowane jest zużycie energii eksplozji w procesie formowania się aerozolu wodnego. Założona jest tu dyssypacja energii wybuchu do trzech kanałów, które są

najistotniejsze przy podstawowym zastosowaniu wytwarzania aerozolu wodnego metodą wybuchową. Rozdział 3 zawiera wyprowadzenie równania pozwalającego oszacować jaka część całkowitej energii wybuchu zostaje zużyta na fragmentację medium aeroszowanego. Rachunki te przeprowadzono na podstawie modelu tego zjawiska.

Rozdział 4 zawiera wyprowadzenie równań ruchu kropeł aerozolu wodnego (bazujący na wspomnianym powyżej modelu), które są podstawą do modelowania zasięgu chmury w funkcji czasu (rozdział 5). Tego typu równania można łatwo zweryfikować przez porównanie z rezultatami uzyskanymi doświadczalnie. Na wykresach określających zależność średnicy chmury aerozolu w funkcji czasu ekspansji zostały wyszczególnione trzy etapy: *obszar nieliniowy*, *obszar Bernoulliego* oraz *obszar Stokesa*. *Obszar nieliniowy* nie jest omawiany w pracy gdyż wykracza poza jej zakres. W *obszarze Bernoulliego* krople aerozolu doznają siły oporu wprost proporcjonalnej do kwadratu ich prędkości, natomiast w *obszarze Stokesa* opór jest wprost proporcjonalny do prędkości.

Rozdział 6 poświęcony jest weryfikacji doświadczalnej modelu zaproponowanego w części teoretycznej rozprawy jak również innym, niezwykle istotnym zagadnieniom, które podyktowane są zastosowaniami praktycznymi aeroszowania wybuchowego. Ta część pracy zawiera wyniki pomiarów dotyczących fali uderzeniowej i rozprzestrzeniania się chmury aerozolu wodnego.

Znaczna część rozdziału 6 poświęcona jest zagadnieniu pomiaru wielkości kropeł aerozolu wodnego powstałego w wyniku wybuchowego aeroszowania. Rozmiary kropeł wyznaczone zostały dwoma sposobami: na podstawie szybkości opadania aerozolu oraz przy pomocy rejestratora kropeł, który pozwalał na „przechwycenie” rozprzestrzeniających się kropeł aerozolu. Ustalenie wielkości kropeł na podstawie śladów pozostawionych na płytce rejestratora wymagało wykonania doświadczeń laboratoryjnych, mających na celu oszacowanie zmiany kształtu kropli po osadzeniu na płytce szklanej. W tym celu wykorzystano metodę pomiarową bazującą na analizie promieniowania elektromagnetycznego rozproszonego przez aerosz. Zastosowano teorię dyfrakcyjną Fraunhofera oraz podjęto próbę wykorzystania teorii Lorenz-Mie. Pierwsza z teorii charakteryzuje się mniejszym błędem wskazującym na podatność na niekorzystne efekty złego postawienia problemu odwrotnego w porównaniu z rozwiązaniami uzyskiwanymi w oparciu o bardziej skomplikowany

model Lorenz-Mie (pod warunkiem spełnienia warunków stosowalności teorii Fraunhofera) [9-14].

Zaprezentowane w pracy modele i szacunki teoretyczne zostały zweryfikowane przez ich porównanie z wynikami uzyskanymi na drodze doświadczalnej. Rozdział 6 pracy zawiera omówienie prób doświadczalnych, na które składało się około 150 prób, a cały cykl badań trwał 7 lat.

Ostatni rozdział prezentuje wyniki i wnioski jakie powstały na podstawie części teoretycznej oraz doświadczalnej tej pracy.

Na końcu rozprawy znajdują się załączniki dotyczące istotnych zagadnień aerozolowania wybuchowego.

Większość prezentowanych w pracy zagadnień ma charakter wstępu do dalszej dyskusji na ich temat. Autor ma nadzieję, że opracowanie to stanie się wstępem do dalszego rozwijania wątków badawczych.

Wyniki prezentowane w tej pracy publikowane były na wielu konferencjach naukowych. Spis tych publikacji znajduje się w ostatnim rozdziale (indeksy pozycji w bibliografii [15-30]).

CEL PRACY I METODOLOGIA PRACY

Zasadniczym celem pracy jest stworzenie modelu pozwalającego zoptymalizować proces produkcji aerozolu wodnego wytworzonego metodą wybuchową.

Efektom przeprowadzonej analizy jest optymalizacja - dobranie optymalnych parametrów w celu wytworzenia aerozolu wodnego o jak najkorzystniejszych właściwościach. Poszukiwanymi parametrami są m.in.: wielkość kapsuły, sposób rozmieszczenia ładunku w kapsule, rodzaj materiału wybuchowego, energia wybuchu ładunku, ilość i rodzaj domieszek dodawanych do wody.

Zadaniem autora nie jest wyjaśnianie procesów prowadzących do powstania aerozolu wodnego lecz modelowanie procesu ekspansji. Opis zjawiska powstawania aerozolu został podjęty przez niektórych autorów (np. [3, 31-34]). Powstały na ten temat modele fizyczne na podstawie których wykonano symulacje numeryczne. Niestety modele te nie mogą, z zadowalającymi efektami, wyjaśniać procesu ekspansji aerozolowania wybuchowego. Przyczyn tego, zdaniem autora, jest kilka, wśród których można wymienić m.in. fakt, że dotychczas nie wyprowadzono na drodze teoretycznej

ogólnego stanu wody [35], który obowiązywałby w bardzo szerokim zakresie zmian jej parametrów termodynamicznych. Ponadto symulacje komputerowe polegające na rozwiązywaniu wielu równań różniczkowych cząstkowych nie mogą być wykonywane dla zbyt wielu iteracji, gdyż występujące tam zaokrąglenia na pojedynczym etapie iteracji kumulują się i rezultaty wypaczają model danego zjawiska [36-39] (wyniki są znacząco różne od wyników pomiarów doświadczalnych).

Zaprezentowany w pracy model procesu ekspansji został zweryfikowany na podstawie danych pomiarowych uzyskanych z wielu prób. Dane te zbierane były za pomocą: kamer (wysokiej rozdzielczości oraz rejestrującej obraz z szybkością do 1000 fps (klatek na sekundę)), czujników ciśnienia oraz przygotowanego specjalnie do celów tych badań rejestratora kropeł, który pozwalał na oszacowanie wielkości kropeł aerozolu wodnego (opis urządzenia znajduje się w rozdziale 6.5.2 oraz Załączniku nr 4).

Metoda pomiaru prędkości czoła chmury aerozolu wodnego opierała się na rejestracji całego procesu za pomocą kamer. Uzyskane nagrania analizowane były poklatkowo przez odpowiednie programy, które umożliwiały wyznaczenie średnicy chmury w funkcji czasu liczonego od chwili wybuchu. Analiza poszczególnych klatek filmu polegała m.in. na ręcznym nanoszeniu obrysu rozprzestrzeniającej się chmury. Próby automatyzacji tego procesu (wykonanie programów analizujących rozprzestrzenianie chmury na podstawie zadanego algorytmu) nie powiodły się ze względu na nieregularności kształtu czoła chmury aerozolu wodnego.

Do nagrania poszczególnych prób wykorzystywane były trzy rodzaje kamer. Pierwsza z nich pracująca z częstotliwością 25 fps (klatek na sekundę) stosowana była w początkowych doświadczeniach (kamera Sony DCR-SR30), kiedy to ustalane zostały ogólne parametry kapsuły wodnej (np. kształt czy rozmieszczenie ładunku wybuchowego). Służyła ona do wstępnej weryfikacji wielu pomysłów i rozwiązań. Druga kamera wykonywała nagrania z częstotliwością 250 fps (przy maksymalnej częstotliwości jej pracy wynoszącej 1000 fps; kamera FASTCAM – Ultima 1024). Uzyskane przy jej pomocy nagrania stanowiły uzupełnienie danych zgromadzonych przy pomocy zwykłej kamery Sony - HD (HDR – FX1E, 25 fps). Konieczność stosowania szybkiej kamery dotyczyła przede wszystkim początkowych chwil ekspansji chmury aerozolu wodnego.

Metoda pomiaru czoła fali uderzeniowej opierała się na wykorzystaniu piezoelektrycznych czujników ciśnienia (typu IPC firmy EC TEST SYSTEMS, symbole 137A21, 137A22, 137A23, 137A24), które to zostały umieszczone na drodze

rozprzestrzeniania się fali uderzeniowej. Czujniki te zbierały dane z częstotliwością próbkowania do 500 000 próbek na sekundę. Aparatura wykorzystywana do pomiarów obsługiwana była przez komputer przemysłowy PXI (National Instruments) z zainstalowanym oprogramowaniem czasu rzeczywistego LabVIEW RT, wyposażonego w odpowiednią kartę pomiarową. Wyniki uzyskane z czujników pozwoliły nie tylko na określenie ciśnień lecz również na określenie prędkości rozprzestrzeniania czoła fali uderzeniowej. Duża częstotliwość próbkowania (pomiar wykonywany co $2\ \mu\text{s}$) przełożyła się na uzyskanie wyników z małym błędem pomiarowym: $7 \div 14\ \text{m/s}$ dla prędkości czoła fali uderzeniowej.

TEZA ROZPRAWY

Połączenie modelowania dedukcyjnego i indukcyjnego pozwala na wypracowanie modelu umożliwiającego zoptymalizowanie procesu aerozolowania wybuchowego w celu uzyskania odpowiedniej wielkości kropel oraz kształtu chmury, dla kapsuł wodnych o pojemności rzędu $1000\ \text{dm}^3$.

2. KAPSUŁA WODNA I WYDAJNOŚĆ JEJ KONFIGURACJI

2.1 Zastosowanie aerozolu wodnego do gaszenia pożarów

Wytworzenie chmury aerozolu wodnego uzależnione jest od umiejscowienia wody względem ładunku wybuchowego. Tego typu konfiguracji jest nieskończenie wiele i aby wykonać analizę tego zagadnienia należy na wstępie poczynić pewne założenia. Najważniejszym z nich jest praktyczne wykorzystanie aerozolowania wybuchowego, którym jest m.in. gaszenie pożarów. Wytworzenie odpowiedniej wielkości kropeł oraz pokrycie nimi odpowiedniego obszaru powoduje, iż należy rozpatrywać dwie najistotniejsze konfiguracje kapsuł wodnych – dla symetrii osiowej i punktowej. Obie spełniają wymagania dotyczące wytwarzania aerozolu jak i sposobu zamocowania podczas prób doświadczalnych, jak i rzeczywistych zastosowań.

W tym podrozdziale przedstawione są wstępne informacje dotyczące uwarunkowań, jakim musi sprostać projekt kapsuły wodnej oraz zawarte są podstawowe informacje dotyczące aerozolowania wybuchowego przy gaszeniu ognia.

Pożary lasów są prowadzą do olbrzymich strat tak w zakresie ogólnie rozumianej „ekologii” jak i strat finansowych ([43, 44, 45, 46]). Tradycyjne sposoby gaszenia polegają na wysłaniu nad źródło ognia brygady pożarniczej, natomiast w trudno dostępnych terenach wykorzystuje się helikoptery i specjalnie przystosowane samoloty, które to zraszają ogień wodą wypuszczaną ze specjalnych pojemników podczepionych pod statkami powietrznymi. Postępowanie takie jest na tyle mało wydajne, że aby ugasić niewielki pożar konieczne jest zaangażowanie wielu samolotów, wozów gaśniczych i brygad strażackich. Mała skuteczność gaśnicza objawia się również tym, że wielokrotnie, w celu opanowania pożaru, należy wypalić tereny, które stoją na jego drodze. Nie zawsze jest to możliwe ze względu na obecność osiedli mieszkalnych, czy różnego rodzaju zakładów. Przyczyny powstawania pożarów oraz ich występowanie w wybranych krajach przedstawione jest w Załączniku nr 1. Dotychczas nie wdrożono skutecznie żadnej alternatywnej metody gaszenia pożarów.

2. KAPSUŁA WODNA I WYDAJNOŚĆ JEJ KONFIGURACJI

Stosuje się natomiast metody, które mają na celu stworzenie zapory gaśniczej, które, ogólnie rzecz biorąc, polegają na detonacji materiału wybuchowego zgromadzonego w specjalnych pojemnikach czy węzłach gaśniczych, które to są ułożone na ziemi. Ich detonację wykonuje się w chwili nadejścia ognia – „metoda frankfurcka” oraz „metoda hiszpańska” [47-49].

Istnieją systemy gaszące ogień aerozolem wodnym – np. Telesto, w których produkuje się aerozol poprzez przyspieszenie strumieniem powietrza kropel wody (powietrze wypychane jest z dyszy z prędkością kilka razy większą od prędkości dźwięku). Tego typu metoda stosowana jest do rozpylania niewielkich ilości wody – rzędu kilkunastu litrów. Wykazane zostało doświadczalnie, iż zdolność gaśnicza tego systemu jest znacznie większa niż tradycyjne polewanie ognia wodą. Dla porównania, autorzy pomysłu szacują, iż kilkanaście litrów wody rozpylanej w omawiany sposób potrafi ugasić pożar na który straż pożarna wylewa kilka metrów sześciennych wody. Ponadto przy pożarach pomieszczeń użycie tradycyjnych metod powoduje, iż klęskę pożaru zamienia się na klęskę powodzi wywołanej akcją gaśniczą.



Rysunek 2.2.1. Sposób podwieszenia kapsuły wodnej pod helikopterem

Prezentowana praca opiera się na pomysłach produkcji aerozolu wodnego metodą wybuchową. Polega on na detonacji ładunku wybuchowego umieszczonego w

pojemniku z wodą. W chwili detonacji następuje fragmentacja, a powstałe krople przemieszczają się symetrycznie w kierunku przeciwnym do centrum wybuchu. Powstały aerozol pokrywa pewien obszar powierzchni, którym docelowo może być źródło ognia. Zaleta takiej metody połączona z metodą zrzutu kapsuły wodnej z pewnej wysokości z helikoptera poruszającego się z prędkością ok. $100 \div 150$ km/h jest niewątpliwa. Helikopter może dokonywać zrzutu w ściśle określony punkt (np. bez widoczności ognia) i natychmiast zawracać nie przelatując nad linią ognia, można też dokonywać zrzutu mając tylko współrzędne geograficzne źródła ognia [20, 24, 25, 26]. Wstępna weryfikacja doświadczalna tego pomysłu wykazała, iż w taki sposób można ugasić ogień powstały z kilku warstw palących się desek sosnowych na powierzchni koła o średnicy 30 m. Dane doświadczalne wskazują, że użycie potencjalnie niebezpiecznej metody nie przekłada się na zagrożenie dla otoczenia (na podstawie danych obrazujących wpływ wielkości nadciśnienia na ciało człowieka zawartych w publikacjach [47, 50]).

2.2 Konfiguracja kapsuły wodnej

Kapsuła wodna jest pojemnikiem na wodę, w której umieszczony jest ładunek wybuchowy. Jej głównym zadaniem jest zapewnienie stałej pozycji wody względem ładunku wybuchowego. Układ woda – ładunek wybuchowy ma natomiast wytworzyć jak najkorzystniejszą chmurę aerozolu wodnego, co rozumiane jest jako uzyskanie jak najmniejszych kropli oraz pokrycie wymaganego obszaru aerozolem o żądanej gęstości. Konstrukcja kapsuły wodnej musi spełniać wymogi bezpieczeństwa oraz ma umożliwić podczepienie do haka helikoptera. Oprócz wymienionych cech należy wziąć pod uwagę koszty produkcji, wagę czy możliwość składowania i transportowania. Usytuowanie ładunku wybuchowego w taki sposób, aby nie miał kontaktu z powietrzem (miał jak najmniejszą powierzchnię kontaktu z powietrzem) ma na celu „wytłumienie” powstającej przy detonacji fali uderzeniowej i uzyskanie nadciśnień bezpiecznych dla człowieka w niewielkiej odległości od centrum wybuchu (zgodnie z danymi opublikowanymi w pracach [47] i [50]).

Na podstawie tak sprecyzowanych kryteriów, jakim musi sprostać kapsuła wodna, należy rozważyć konfigurację o symetrii osiowej lub punktowej.

W rozdziale tym przedstawione zostaną dwie konfiguracje rozmieszczenia materiałów wybuchowych wewnątrz kapsuły. Przedstawiona tu analiza dotyczy właściwości geometrycznych chmury aerozolu wodnego i jest istotna z punktu widzenia wydajności rozpatrywanych konfiguracji. Zaprezentowane tu zupełnie inne „spojrzenie” na aerozolowanie wybuchowe, które dostępne jest w literaturze naukowej z dziedziny mechaniki wybuchu (np. [4, 51-54]). Woda, jako podstawowy reprezentant ośrodków ciągłych, jest słabo zbadana, gdyż dotychczas nie wyprowadzono na drodze teoretycznej ogólnego stanu wody, który obowiązywałby w bardzo szerokim zakresie zmian jej parametrów termodynamicznych. Woda posiada bardzo złożoną strukturę molekularną i modele opisujące to zagadnienie znacznie odbiegają od rzeczywistości [35, 55-58]. Przedstawione w tej pracy bardzo proste modele w zadowalający sposób opisują szereg procesów aerozolowania wybuchowego i z punktu widzenia celów postawionym tej pracy są wystarczające.

Założono dwie możliwości umieszczenia ładunku wybuchowego wewnątrz kapsuły wodnej: w centralnej części – konfiguracja sferyczna (Rysunek 2.1) oraz wzdłuż osi symetrii – konfiguracja cylindryczna (Rysunek 2.2).

W przypadku konfiguracji sferycznej woda zgromadzona w kulistej kapsule (o promieniu R) zostaje symetrycznie wyparta na zewnątrz w wyniku eksplozji ładunku wybuchowego. Przy pewnych założeniach można przyjąć, że rozprzestrzenianie się wody zgromadzonej w kapsule powoduje przyrost powierzchni zewnętrznej kapsuły (r_{zew} – promień zewnętrzny), natomiast w jej centralnym punkcie tworzy się pusta przestrzeń (o promieniu r_{wew}). Wówczas spełniony jest warunek:

$$\frac{4}{3}\pi R^3 = \frac{4}{3}\pi(r_{zew}^3 - r_{wew}^3), \quad (2.1)$$

który po uproszczeniu daje wzór

$$R^3 = r_{zew}^3 - r_{wew}^3. \quad (2.2)$$

Grubość rozprzestrzeniającej się chmury wynosi

$$\Delta r_{sfer} = r_{zew} - r_{wew}, \quad (2.3)$$

natomiast promień wewnętrzny w funkcji promienia początkowego to

$$r_{wew} = (r_{zew}^3 - R^3)^{\frac{1}{3}}. \quad (2.4)$$

Korzystając z równań (2.3) i (2.4) można otrzymać zależność

$$\Delta r_{sfer} = r_{zew} - (r_{zew}^3 - R^3)^{\frac{1}{3}}. \quad (2.5)$$

Wprowadzając do (2.5) współczynnik

$$w = \frac{r_{zew}}{R}, \quad (2.6)$$

wzór ten przyjmuje następującą postać

$$\Delta r_{sfer}(R, w) = R \left[w - (w^3 - 1)^{\frac{1}{3}} \right]. \quad (2.7)$$

W przypadku gdy $w \gg 1$

$$\Delta r_{sfer}(R, w) \approx \frac{R}{3w^2}. \quad (2.8)$$

Widać, że w przypadku konfiguracji cylindrycznej grubość powłoki wody zmniejsza się odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu parametru w , który odzwierciedla wzrost promienia zewnętrznego chmury.

Rozważając konfigurację cylindryczną zostaje poczynione założenie, iż ekspansja wody występuje jedynie prostopadle do osi symetrii kapsuły (nie ma ekspansji wzdłuż osi symetrii). Przybliżenie to może być dokonane, gdy wysokość kapsuły l jest większa od jej średnicy.

2. KAPSUŁA WODNA I WYDAJNOŚĆ JEJ KONFIGURACJI

Postępując analogicznie jak przy konfiguracji sferycznej otrzymuje się następujące zależności

$$\pi R^2 l = \pi (r_{zew}^2 - r_{wew}^2) l, \quad (2.9)$$

oraz

$$R^2 = r_{zew}^2 - r_{wew}^2. \quad (2.10)$$

Grubość powłoki wody opisuje zależność

$$\Delta r_{cyl} = r_{zew} - (r_{zew}^2 - R^2)^{\frac{1}{2}}, \quad (2.11)$$

która przy uwzględnieniu (2.6) przyjmuje postać

$$\Delta r_{cyl}(R, w) = R \left[w - (w^2 - 1)^{\frac{1}{2}} \right]. \quad (2.12)$$

Zakładając, że $w \gg 1$

$$\Delta r_{cyl}(R, w) \approx \frac{R}{2w}. \quad (2.13)$$

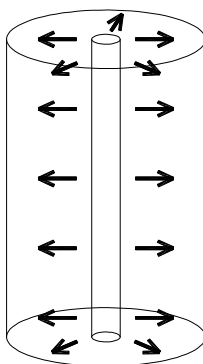
Grubość rozprzestrzeniającej się powłoki wody w przypadku konfiguracji cylindrycznej maleje znacznie wolniej niż w modelu sferycznym. Ilustruje to Tabela 2.1, gdzie podano liczbowe wartości Δr dla obu konfiguracji w oparciu o wzory (2.8) i (2.13).

2. KAPSUŁA WODNA I WYDAJNOŚĆ JEJ KONFIGURACJI

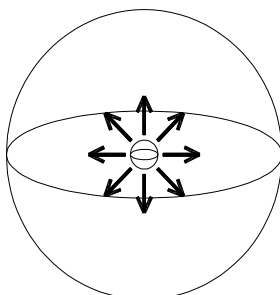
Tabela 2.1. Grubość rozprzestrzeniającej się powłoki w konfiguracji sferycznej i cylindrycznej w oparciu o wzory: (2.8) i (2.13) (R – wyjściowy promień kapsuły wodnej)

w	$\Delta r_{sfer}(R)$	$\Delta r_{cyl}(R)$
2	1/12	1/4
3	1/27	1/6
4	1/48	1/8
5	1/75	1/10
10	1/300	1/20
15	1/675	1/30
20	1/1200	1/40
25	1/1875	1/50
30	1/2700	1/60
35	1/3675	1/70
40	1/4800	1/80

Przytoczone wyniki wskazują (Tabela 2.1), że transfer energii do powłoki wody jest znacznie wydajniejszy w przypadku konfiguracji cylindrycznej.

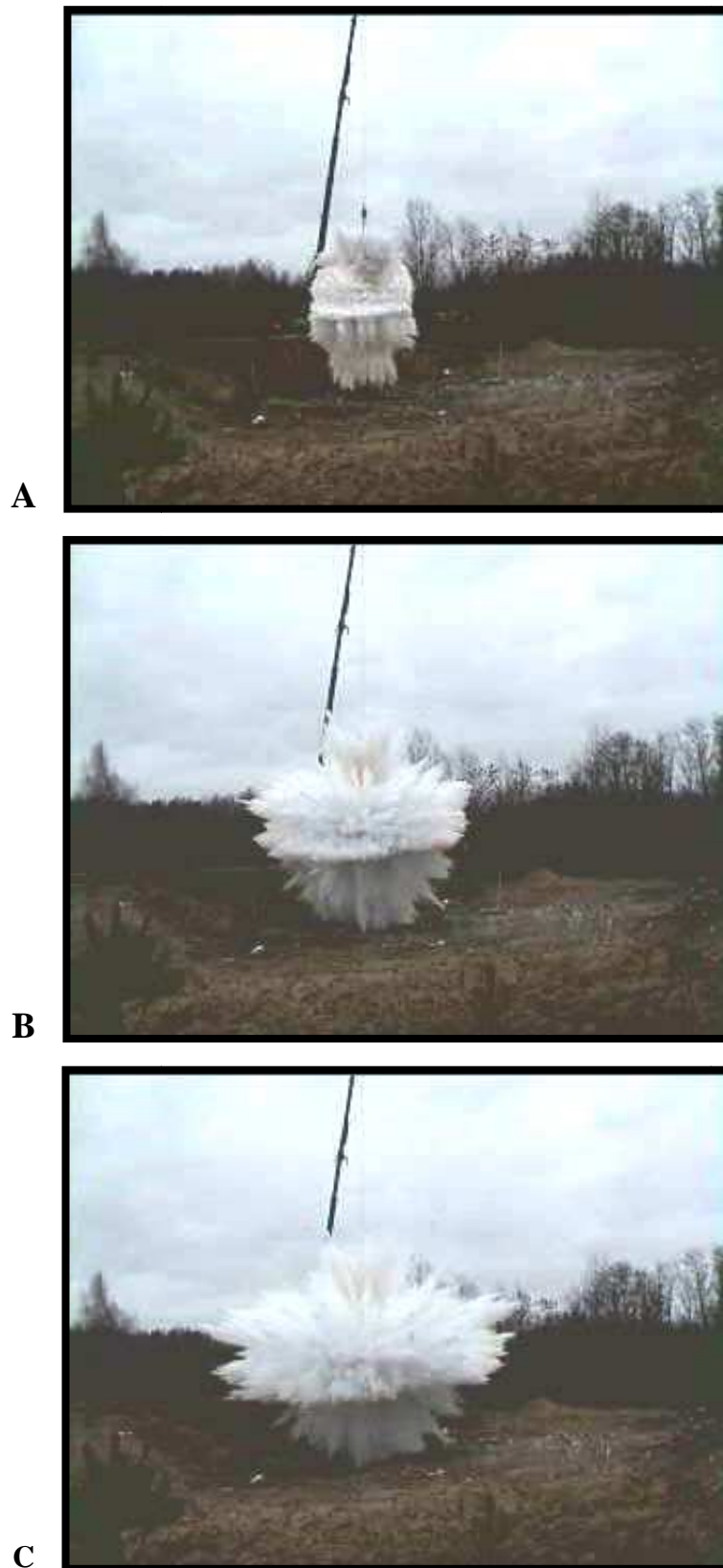


Rysunek 2.1. Cylindryczna konfiguracja kapsuły wodnej



Rysunek 2.2. Sferyczna konfiguracja kapsuły wodnej

Na Rysunku 2.3 przedstawione jest zjawisko formowania się chmury aerozolu wodnego dla jednej z prób poligonowych. W kapsule wodnej został umieszczony ładunek wybuchowy w konfiguracji sferycznej (zgodnie z Rysunkiem 2.2). Kolejne klatki filmu zostały zarejestrowane dla czasów: A – 40 ms, B – 80 ms, C – 160 ms licząc od chwili eksplozji ładunku wybuchowego. Rysunek 2.3 ukazuje, iż pomimo umiejscowienia ładunku wybuchowego wzdłuż osi kapsuły nie uzyskano kształtu chmury przewidywanego w konfiguracji cylindrycznej. Uzyskano tu pewnego rodzaju złożenie konfiguracji sferycznej z cylindryczną. Z punktu widzenia gaszenia pożarów aerozolem wodnym strumień chmury opadający prostopadle na źródła ognia jest pożądanym efektem. Niekorzystny jest natomiast strumień przemieszczający się w kierunku odwrotnym niż pożar, a w związku z tym poczynione zostały próby wyeliminowania go, a efekty tych prac przedstawione zostały w kolejnych podrozdziałach tej pracy (m.in. rozdział 6.2).



Rysunek 2.3. Formowanie się chmury aerozolu wodnego (konfiguracja cylindryczna).

A – 40 ms po wybuchu, B – 80 ms po wybuchu, C – 160 ms po detonacji

3. ENERGIA EKSPLOZJI I JEJ ROZPROSZENIE

Energia wyzwolona podczas detonacji ładunku wybuchowego (E_{exp}) w kapsule wodnej zostaje zużyta na (podział ten wynika z celów jakie postawione są autorowi tej pracy):

- o fragmentację wody zgromadzonej w kapsule – E_{frag} ,
- o przyspieszenie kropeł (nadanie pewnej prędkości początkowej) – E_{acc} .

Ta część energii, która nie zostaje zużyta na powyższe procesy traktowana jest jako energia stracona – E_{loss} . Bilans energetyczny procesu powstawania aerozolu wodnego można zatem opisać następującym równaniem:

$$E_{exp} = E_{frag} + E_{acc} + E_{loss}. \quad (3.1)$$

W rozdziale tym zostanie przedyskutowane zużycie energii eksplozji w procesie formowania się aerozolu wodnego. Szacunki zostają poczynione przy założeniu, że aerozol wodny składa się z N jednakowych kropełek o promieniu r_N . Ponadto zakłada się, iż energia eksplozji, a dokładniej część całkowitej energii wybuchu, zostaje zużyta jedynie na zwiększenie pola powierzchni wody z początkowej wartości S_0 do końcowej S_N .

Początkowy obszar kuli (aerozolu wodnego) o promieniu R wynosi

$$S_0 = 4\pi R^2. \quad (3.2)$$

Całkowita powierzchnia N kropełek wynosi

$$S_N = N s_N, \quad (3.3)$$

gdzie powierzchnia jednej kropli to

$$s_N = 4\pi r_N^2. \quad (3.4)$$

Relacja pomiędzy powierzchnią początkową S_0 i końcową S_N opiera się na warunku

$$V_0 = V_N, \quad (3.5)$$

gdzie

$$V_N = Nv_N, \quad (3.6)$$

i

$$V_0 = \frac{4}{3}\pi R^3, \quad (3.7)$$

oraz

$$v_N = \frac{4}{3}\pi r_N^3. \quad (3.8)$$

Po porównaniu (3.6), (3.7), i (3.8) oraz wstawieniu do (3.5) otrzymuje się

$$R^3 = Nr_N^3, \quad (3.9)$$

oraz wzór określający promień kropli w odniesieniu do ich liczby

$$r_N = RN^{-\frac{1}{3}}. \quad (3.10)$$

Wstawiając (3.10) do (3.3) powierzchnia kropelek wynosi

$$S_N = N4\pi R^2 N^{-\frac{2}{3}} = N^{\frac{1}{3}}4\pi R^2. \quad (3.11)$$

Biorąc pod uwagę wzór (3.2) uzyskuje się

$$S_N = N^{\frac{1}{3}} S_0. \quad (3.12)$$

Przyrost powierzchni wynosi

$$\Delta S = S_N - S_0 = \left(N^{\frac{1}{3}} - 1 \right) S_0, \quad (3.13)$$

który przy założeniu powstania małych kropelek $\left(N^{\frac{1}{3}} \gg 1 \right)$ daje następujący szacunek

$$\Delta S \approx N^{\frac{1}{3}} S_0. \quad (3.14)$$

Zastępując liczbę kropelek N odpowiadającym udziałem r_N otrzymuje się

$$\Delta S \approx \frac{R}{r_N} S_0. \quad (3.15)$$

Energia potrzebna na zwiększenie pola powierzchni granicy faz o ΔS spełnia zależność

$$\Delta E = K \Delta S, \quad (3.16)$$

gdzie K jest współczynnikiem napięcia powierzchniowego na granicy faz [49]. Wzór ten pozwala oszacować jaka ilość energii zostaje zużyta do rozproszenia wody (zgromadzonej w kapsule) na N jednakowych kropelek o promieniu r .

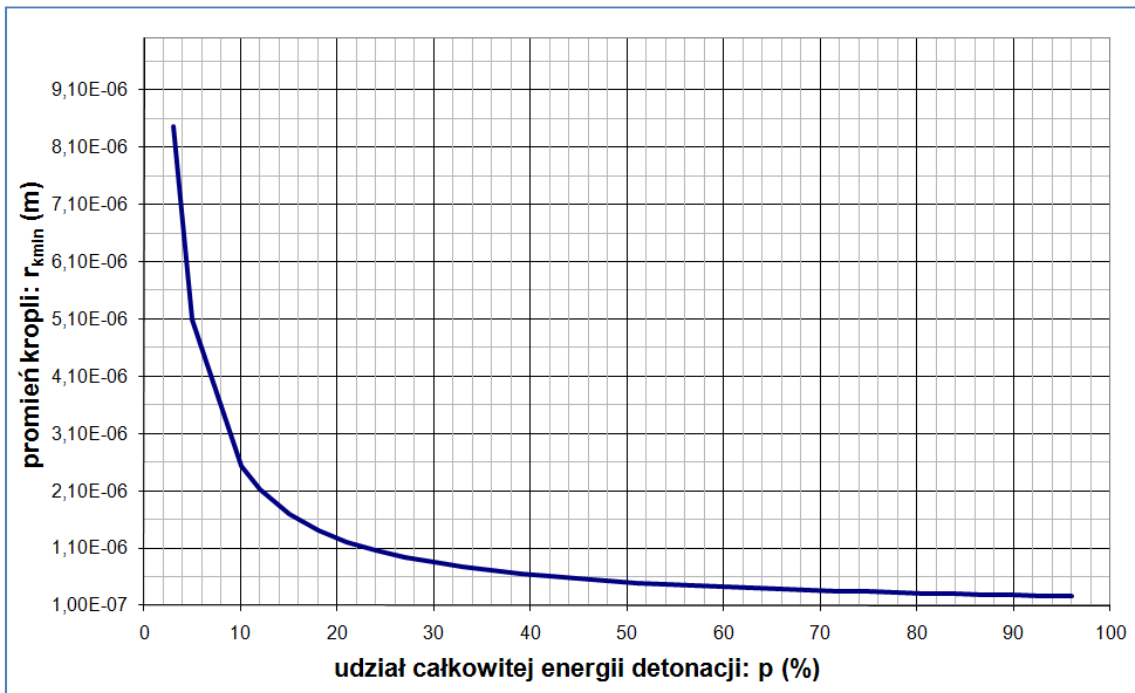
Ten sam wzór może posłużyć do oszacowania minimalnego promienia kropelek r_{kmin} , pod warunkiem, że znana jest energia eksplozji, która zużyta jest na fragmentację wody

$$E_{frag} = \Delta E(r_{kmin}) = K \frac{R}{r_{kmin}} S_0, \quad (3.17)$$

skąd

$$r_{k \min} = \frac{KS_0}{E_{frag}} R. \quad (3.18)$$

Zakładając, że energia eksplozji pochodzi od ładunku którego energia wybuchu wynosi $E_{exp} = 1,3$ MJ, natomiast kapsuła wodna o promieniu $R = 0,71$ m i pojemności $1,5$ m³ ma powierzchnię $S_0 = 6,33$ m², korzystając z (3.18) wynika, iż minimalny promień uzyskanych kropelek jest wielkością rzędu 10^{-6} m – Rysunek 3.1. Promień ten uzależniony jest od tego, jaka część energii eksplozji zostanie zażyta na fragmentację. Na Rysunku 3.1 przedstawione są szacunki dla udziału od 3 % do 96 %. W obliczeniach przyjęto współczynnik napięcia powierzchniowego wody $K = 0,07275$ J/m² [60].



Rysunek 3.1. Minimalny promień kropli aerozolu wodnego oszacowany na podstawie wzoru (3.18). Wielkość kropli uzależniona jest od tego, jaki procent p całkowitej energii wybuchu zostanie zużyty na fragmentację. Oszacowanie wielkości kropelek aerozolu wodnego wykonano dla jednej z prób poligonowych: kapsuła o masie 1500 kg, promieniu $R = 0,71$ m i powierzchni $S_0 = 6,33$ m². Ładunek wybuchowy umieszczony wewnątrz kapsuły ma energię około 1,3 MJ (Emulinit)

Całkowita energia wybuchu E_{exp} dyssypuje się w różne kanały. Z punktu widzenia opracowywanego systemu interesujące ważne są trzy kanały zbiorcze. Energia przekazywana ośrodkowi może być traktowana jako praca użyteczna, natomiast pozostałą część energii wybuchu, którą oznaczymy przez E_{loss} należy traktować jako straty. Praca użyteczna zapewnia fragmentację masy ośrodka oraz jej przyspieszenie. Część energii wybuchu zużytej na fragmentację oznaczamy przez E_{frag} , a część zużytej na akcelerację przez E_{acc} . Wobec powyższej dyskusji oczywista staje się równość (3.1).

Teoretyczne określenie podziału energii wybuchu między te trzy kanały jest nadzwyczaj trudne, jeśli w ogóle możliwe. Natomiast stosunkowo łatwe może być wyznaczenie części energii zużytej na fragmentację na podstawie znajomości, rozkładu promienia kropli.

Zakładamy, że rozkład ten jest opisany wzorem

$$\rho(r) = \alpha \rho_p(r), \quad (3.19)$$

gdzie ρ_p oznacza gęstość prawdopodobieństwa spełniającą warunek normalizacyjny

$$\int_0^{\infty} \rho_p(r) dr = 1. \quad (3.20)$$

Funkcja rozkładu promienia ρ spełnia warunek

$$\int_0^{\infty} \rho(r) V(r) dr = V_0, \quad (3.21)$$

który odpowiada oczywistemu faktowi, że sumaryczna objętość wszystkich kropli (lewa strona równości) jest równa pierwotnej objętości całej masy wodnej.

Przy założeniu sferycznego kształtu kropli oraz oznaczeniu promienia kuli o początkowej objętości przez R , otrzymuje się

$$V(r) = \frac{4\pi r^3}{3} \quad \text{oraz} \quad V_0 = \frac{4\pi R^3}{3}. \quad (3.22)$$

Podstawienie powyższych wzorów do (3.21) daje równość

$$\alpha \int_0^{\infty} \rho_p(r) r^3 dr = R^3. \quad (3.23)$$

Biorąc pod uwagę fakt, że

$$\int_0^{\infty} \rho_p(r) r^3 dr = m_3, \quad (3.24)$$

czyli że całka daje zwykły moment trzeciego rzędu gęstości prawdopodobieństwa ρ_p , współczynnik wagowy α można wyrazić wzorem

$$\alpha = R^3 / m_3. \quad (3.25)$$

Całkowite pole powierzchni kropeł wyraża się wzorem

$$A_{tot} = \int_0^{\infty} \rho(r) A(r) dr, \quad (3.26)$$

gdzie

$$A(r) = 4\pi r^2. \quad (3.27)$$

W konsekwencji wzór na całkowite pole powierzchni zewnętrznej kropeł można napisać w postaci

$$A_{tot} = \alpha \int_0^{\infty} \rho_p(r) 4\pi r^2 dr, \quad (3.28)$$

przy czym całka

$$\int_0^{\infty} \rho_p(r) r^2 dr = m_2 \quad (3.29)$$

określa moment zwykły drugiego rzędu gęstości prawdopodobieństwa. Wobec tego całkowite pole powierzchni kropeł wyraża się wzorem

$$A_{tot} = 4\pi R^3 m_2 / m_3, \quad (3.30)$$

A więc wyraża się bezpośrednio przez promień równoważny masy wody oraz momenty zwykłe drugiego i trzeciego rzędu gęstości prawdopodobieństwa rozkładu promieni kropeł.

Przy założeniu znaczącego stopnia pulweryzacji, czyli przy spełnieniu nierówności $A_{tot} \gg A_0$, otrzymuje się następujący wzór na energię fragmentacji E_{frag}

$$E_{frag} = 4\pi K R^3 m_2 / m_3, \quad (3.31)$$

gdzie K oznacza współczynnik napięcia powierzchniowego. Wzór (3.31) pozwala określić energię fragmentacji jeśli tylko znane są momenty rozkładu promieni kropeł. Momenty te mogą zostać oszacowane na podstawie pomiarów promieni r_n znacznej liczby N kropeł

$$m_2 \approx \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N r_n^2 \quad \text{oraz} \quad m_3 \approx \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N r_n^3. \quad (3.32)$$

Nawet przed uzyskaniem wyników pomiarów można przetestować model dla różnych, teoretycznie założonych rozkładów.

Tak więc dla rozkładu z gęstością

$$\rho_p(r) = r_0^{-1} \exp(-r/r_0) \quad (3.33)$$

otrzymuje się energię fragmentacji wyrażoną wzorem

$$E_{frag} = 4\pi KR^3 / 3r_0, \quad (3.34)$$

dla rozkładu z gęstością

$$\rho_p(r) = r_0^{-2} r \exp(-r/r_0) \quad (3.35)$$

wzór na energię fragmentacji przyjmuje postać

$$E_{frag} = \pi KR^3 / r_0, \quad (3.36)$$

a dla rozkładu z gęstością prawdopodobieństwa

$$\rho_{r_0,\sigma}(r) = (\sqrt{2\pi}\sigma)^{-1} \exp[-(r-r_0)^2 / 2\sigma^2], \quad (3.37)$$

przy założeniu, że $4\sigma < r_0$, otrzymuje się

$$E_{frag} = 4\pi K \frac{r_0^2 + \sigma^2}{r_0^2 + 3\sigma^2} \frac{R^3}{r_0}. \quad (3.38)$$

Wreszcie w przypadku granicznym

$$\rho_{r_0}(r) = \lim_{\sigma \rightarrow 0} \rho_{r_0,\sigma}(r) = \delta(r-r_0), \quad (3.39)$$

odpowiadającym identycznym kroplom o promieniu r_0 , otrzymuje się

$$E_{frag} = 4\pi KR^3 / r_0. \quad (3.40)$$

W przypadku worka zawierającego 1500 kg wody, co odpowiada promieniowi równoważnemu $R = 0,71$ m oraz początkowemu polu powierzchni zewnętrznej $A_0 = 6,33$ m², oraz całkowitej energii wybuchu ładunku (Emulinit) wynoszącego około 13,1 MJ, przy wartości współczynnika napięcia powierzchniowego dla wody $K =$

$0,07275 \text{ J/m}^2$ [60], dla średniego promienia kropli rzędu 10^{-5} m, otrzymuje się $E_{frag} \approx 400$ kJ (tzn. około 3 % energii wybuchu E_{exp}) dla rozkładu gaussowskiego z $\sigma \ll r_0$, do $E_{frag} \approx 100$ kJ dla rozkładu wykładniczego. Dziesięciokrotnie mniejszy promień średni odpowiadałby o rząd większej energii fragmentacji.

Pomiar promieni kropeł pozwoli oszacować parametry rzeczywistego rozkładu wielkości kropeł a w konsekwencji oszacować, ze znaczną dokładnością, energię zużytą na fragmentację wody (Rozdział 6.6).

4. RÓWNANIE RUCHU KROPEL AEROZOLU

Rozważając rozprzestrzenianie się kropeł aerozolu wodnego przyjęto występowanie oporów ruchu wywołanych tarciami z otaczającym płynem – powietrzem. W rozdziale tym zasięg kropelek mgiełki zostanie przeanalizowany w oparciu o równania ruchu dla trzech idealnych przypadków.

Pierwszy z nich opiera się na założeniu, że siła oporu zgodna jest z zależnością (przypadek Bernoulliego [61])

$$F_B = \hat{\alpha}v^2. \quad (4.1)$$

Drugi zakłada występowanie następujących oporów (przypadek Stokesa [42])

$$F_S = \hat{\beta}v. \quad (4.2)$$

Ostatni jest kombinacją obu poprzednich

$$F_{BS} = \hat{\alpha}v^2 + \hat{\beta}v. \quad (4.3)$$

We wzorach (4.1), (4.2), (4.3) v oznacza prędkość natomiast $\hat{\alpha}$ i $\hat{\beta}$ to współczynniki oporu.

Dla przypadku Bernoulliego równanie ruchu kropli aerozolu wodnego wygląda następująco

$$m \frac{dv}{dt} = -\hat{\alpha}v^2, \quad (4.4)$$

gdzie m oznacza masę kropli.

Wzór ten można zapisać

$$\frac{dv}{dt} = -\alpha v^2, \quad (4.5)$$

przy czym nowy współczynnik oporu to

$$\alpha = \frac{\hat{\alpha}}{m}. \quad (4.6)$$

Rozwiązaniem (4.5), z uwzględnieniem warunku początkowego $v_0 = v(0)$, jest zależność prędkości od czasu

$$v(t) = \frac{v_0}{1 + v_0 \alpha t}, \quad (4.7)$$

oraz, przy uwzględnieniu warunku brzegowego $s(0) = 0$, zależność przebytej drogi w funkcji czasu

$$s(t) = \frac{1}{\alpha} \ln(1 + v_0 \alpha t). \quad (4.8)$$

Przemieszczenie kropli zgodne z (4.8) sugeruje, że zasięg ruchu, bez względu na prędkość początkową, jest nieskończony

$$\lim_{t \rightarrow \infty} s(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{\alpha} \ln(1 + v_0 \alpha t) = \infty. \quad (4.9)$$

W przypadku oporów Stokesa równania opisujące ruch kropli spełniają następujące równanie

$$\frac{dv}{dt} = -\beta v, \quad (4.10)$$

gdzie

$$\beta = \frac{\hat{\beta}}{m}. \quad (4.11)$$

Rozwiązaniem (4.10), dla takich samych warunków początkowych i brzegowych jak w przypadku Bernoulliego, jest

$$v(t) = v_0 e^{-\beta t}, \quad (4.12)$$

oraz

$$s(t) = \frac{v_0}{\beta} (1 - e^{-\beta t}). \quad (4.13)$$

Zasięg kropli dla tego przypadku jest ograniczony i ma na niego wpływ prędkość początkowa v_0

$$s_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} s(t) = \frac{v_0}{\beta}. \quad (4.14)$$

Dla wystarczająco dużych prędkości kropli dominuje reżim Bernoulliego

$$\alpha v^2 \gg \beta v, \quad (4.15)$$

natomiast przy dostatecznie małych przewagę ma opór Stokesa

$$\alpha v^2 \ll \beta v. \quad (4.16)$$

Wystarczająco duże prędkości oznaczają $v \gg v_s$, a dostatecznie małe $v \ll v_s$. Sugeruje to występowanie prędkości (granicznej), po której następuje przejście od reżimu Bernoulliego do Stokesa

$$\alpha v_s^2 = \beta v_s, \quad (4.17)$$

a więc

$$v_s = \frac{\beta}{\alpha}. \quad (4.18)$$

Dla szerokiego zakresu prędkości zaden z dwóch poprzednich przypadków nie daje dobrego przybliżenia realnej sytuacji. Sugeruje to celowość rozważenia jeszcze jednego wariantu, będącego kombinacją poprzednich – (4.3). W tym przypadku wzory obrazujące ruch kropeł spełniają równanie

$$\frac{dv}{dt} = -\alpha v^2 - \beta v, \quad (4.19)$$

którego rozwiązanie to

$$v(t) = v_s \frac{v_0 e^{-\beta t}}{v_0 + v_s - v_0 e^{-\beta t}}, \quad (4.20)$$

oraz

$$s(t) = -v_s \left[t - \frac{1}{\beta} \ln \left| 1 - \left(1 + \frac{v_s}{v_0} \right) e^{\beta t} \right| \right] - \frac{1}{\alpha} \ln \left(\frac{v_s}{v_0} \right). \quad (4.21)$$

Ze względu na swą złożoną postać powyższe równanie nie pozwala na głębszą interpretację fizyczną danego zagadnienia.

Rozważając rozprzestrzenianie się chmury aerozolu wodnego z punktu widzenia jej zasięgu istotny jest fakt, że największa ekspansja następuje dla dużych wartości prędkości. Ta faza zdominowana jest przez opory Bernoulliego. Kropelki wody po przekroczeniu prędkości granicznej v_s doznają oporów Stokesa. Oszacowanie parametrów przejścia od jednego reżimu do drugiego można dokonać opierając się na rozwiązaniu równania (4.4)

$$Rp = s(t_s), \quad (4.22)$$

gdzie t_s jest wyznaczone ze wzoru

$$v(t_s) = v_s. \quad (4.23)$$

Na podstawie (4.7)

$$t_s = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{1}{v_s} - \frac{1}{v_0} \right), \quad (4.24)$$

lecz ze względu na duże wartości v_0 (wartość kilkunastokrotnie większa od prędkości dźwięku)

$$t_s \approx (\alpha v_s)^{-1} = \beta^{-1}. \quad (4.25)$$

Przejście od reżimu Bernoulliego do Stokesa następuje w odległości R_p od miejsca wybuchu

$$R_p \approx \frac{1}{\alpha} \ln \left(\frac{v_0}{v_s} \right). \quad (4.26)$$

Wzór ten pokazuje, że zasięg kropelek R_p wzrasta bardzo wolno przy zwiększaniu wartości v_0 . Dla przykładu, gdy $v_0 = 10^2 v_s$ zwiększymy dwukrotnie, wówczas R_p wzrośnie jedynie o 15%.

5. ZASIĘG AEROZOLU W FUNKCJI CZASU

Model analityczny zjawiska rozprzestrzeniania się chmury aerozolu wodnego opiera się na założeniu, iż średnica chmury może być wyznaczona poprzez zasięg jednej „statystycznej” kropli, która, po procesie fragmentacji wody zgromadzonej w kapsule, porusza się poprzecznie do jej osi.

Ruch kropli może być opisany równaniami (wzory 4.4 oraz 4.10 z rozdziału 4):

$$m \frac{dv}{dt} = -\hat{\alpha} v^2 \quad (5.1)$$

dla reżimu Bernoulliego oraz

$$m \frac{dv}{dt} = -\hat{\beta} v \quad (5.2)$$

dla reżimu Stokesa.

W reżimie Bernoulliego uogólniony współczynnik oporu wyraża się wzorem [61]

$$\hat{\alpha} = c \frac{\rho_{pow}}{2} S, \quad (5.3)$$

przy czym c to współczynnik oporu aerodynamicznego kropli, ρ_{pow} - gęstość powietrza, natomiast S – powierzchnia czołowa kropli (przekrój osiowy).

Równanie (5.1) można zapisać w postaci

$$\dot{v} = -\alpha v^2, \quad (5.4)$$

gdzie $\alpha = \frac{\hat{\alpha}}{m}$. Ponieważ masa kulistej kropli wyraża się wzorem (4.29) a jej powierzchnia czołowa wzorem (4.30) jawna postać współczynnika α wygląda następująco

$$\alpha = c \frac{3\rho_{pow}}{8\rho_{wod}} r_k^{-1}. \quad (5.5)$$

Wprowadzając oznaczenie

$$\gamma = c \frac{3\rho_{pow}}{8\rho_{wod}}, \quad (5.6)$$

wzór określający zasięg kropli dla przypadku Bernoulliego, równanie

$$z(t) = \frac{1}{\alpha} \ln(1 + v_0 \alpha t). \quad (5.7)$$

można zapisać następująco

$$z(t) = \frac{r_k}{\gamma} \ln\left(1 + \gamma_0 \frac{t}{r_k}\right) \quad (5.8)$$

Średnica chmury aerozolu wodnego wynosi

$$D(t) = \frac{2r_k}{\gamma} \ln\left(1 + \gamma_0 \frac{t}{r_k}\right). \quad (5.9)$$

Ponieważ promień kropli jest wielkością bardzo małą (oszacowanie na podstawie (3.18): $10^{-7} \div 10^{-5}$ m) można przyjąć

$$\gamma_0 \frac{t}{r_k} \gg 1, \quad (5.10)$$

a w związku z tym (5.9) przyjmuje postać

$$D(t) = \frac{2r_k}{\gamma} \ln \left(\gamma_0 \frac{t}{r_k} \right). \quad (5.11)$$

W celu uproszczenia zapisu można równanie (5.11) przedstawić w postaci

$$D(\tau) = A\tau + B, \quad (5.12)$$

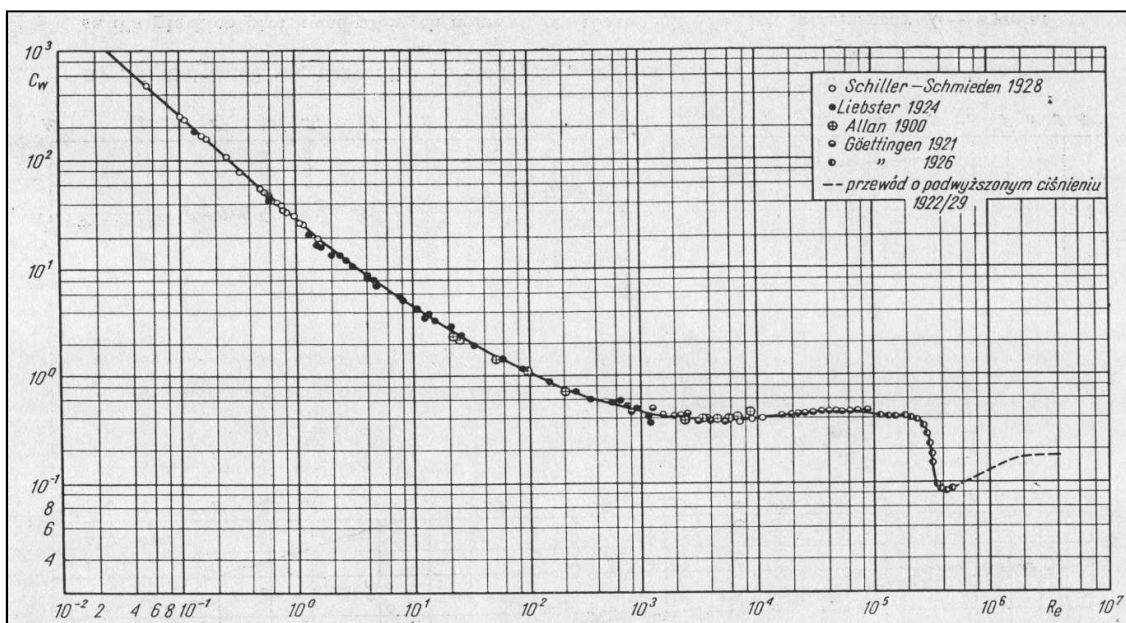
gdzie $\tau = \ln t$.

Wynika stąd, że średnica chmury aerozolu wodnego w zależności od czasu, przedstawionego na skali logarytmicznej, powinna być funkcją liniową.

Wartość współczynnika oporu aerodynamicznego kropli c jest zależna od trzech wielkości: v – szybkości ruchu, r_k – średnicy kropli oraz ν - lepkości kinematycznej płynu opływającego ciało. Parametry te ujmuje w sposób globalny liczba Reynoldsa [53]

$$Re = \frac{2r_k v}{\nu}. \quad (5.13)$$

Podczas opływu kulistego ciała występuje zjawisko zmiany współczynnika oporu aerodynamicznego z wartości $c \approx 0,4$ do $c \approx 0,2$, które ma miejsce przy liczbie $Re \approx 3 \cdot 10^5$ („kryzys oporu”) – Rysunek 5.1 ([62, 63]). W związku z tym uzasadniona zdaje się być następująca hipoteza: równanie (5.12) może być funkcją podwójnie liniową, pod warunkiem rozpatrywania obszaru, obejmującego krytyczną liczbę Re . Trafność tych wniosków zostanie przedyskutowana na podstawie danych doświadczalnych (rozdział 6.2 pracy).



Rysunek 5.1. Współczynnik oporu aerodynamicznego kuli w funkcji liczby Reynoldsa [64]

Teoretyczne opracowanie zagadnienia rozprzestrzeniania się chmury aerozolu wodnego skłaniają do wyciągnięcia następujących wniosków (wszystkie występujące tu oznaczenia zgodne są z Rysunkiem 5.2):

1. Woda w wyniku detonacji ładunku wybuchowego zostaje podzielona na krople (powstaje aerozol wodny), które następnie są rozpędzone przez gazy powstałe w wyniku detonacji. Gazy te, ze względu na dużą prędkość rozprzestrzeniania, nie wpływają później na ekspansję chmury. Krople aerozolu osiągają pewną prędkość początkową, a następnie poruszają się ruchem opóźnionym.
2. W początkowej fazie ruchu drobin aerozolu wodnego dominują opory, które są wprost proporcjonalne do kwadratu ich prędkości – „reżim Bernoulliego”. Średnica chmury może być, w tym etapie, opisana następującym równaniem:

$$D_B(t) = \frac{2}{\alpha} \ln(1 + \alpha v_B(t - t_B)) + D_B, \quad (5.14)$$

dla $t_B \leq t < t_S$, gdzie

$$\alpha = \frac{\hat{\alpha}}{m},$$

$D_B(t)$ - (m), średnica chmury aerozolu wodnego w funkcji czasu (t (s)), reżim Bernoulliego,

D_B - (m), średnica chmury aerozolu wodnego w chwili przejścia w „obszar Bernoulliego”, $D_B = D(t_B)$,

$\hat{\alpha}$ - (kg/m), współczynnik oporu aerodynamicznego kropli, która przemieszcza się w „obszarze Bernoulliego”,

v_B - (m/s), prędkość, po której kropla (chmura aerozolu wodnego) przechodzi w „obszar Bernoulliego”, $v_B = v(t_B)$,

m - (kg), masa kropli aerozolu wodnego,

t_B - (s), czas, po którym kropla (chmura aerozolu wodnego) przechodzi w „obszar Bernoulliego”,

t_S - (s), czas, po którym kropla (chmura aerozolu wodnego) przechodzi w „obszar Stokesa”.

Obszar ten może obejmować krytyczną liczbę Reynoldsa ($Re \approx 3 \cdot 10^5$ [64]), w związku z tym prawdopodobna jest tu skokowa zmiana nachylenia wykresu.

Równanie (5.14) można, na podstawie (5.10) przedstawić w postaci

$$D_B(t) = \frac{2}{\alpha} \ln(\alpha v_B(t - t_B)) + D_B \quad (5.15)$$

oraz

$$D_B(t) = \frac{2}{\alpha} \ln(\alpha v_B) + D_B + \frac{2}{\alpha} \ln(t - t_B). \quad (5.16)$$

Wprowadzając podstawienie $\tau = \ln(t - t_B)$ otrzymuje się

$$D_B(\tau) = A + B\tau \quad (5.17)$$

dla

$$A = \frac{2}{\alpha} \ln(\alpha v_B) + D_B \quad \text{oraz} \quad B = \frac{2}{\alpha}. \quad (5.18)$$

Średnica chmury w funkcji czasu przedstawionego na skali logarytmicznej jest więc funkcją liniową.

3. Po znacznym wyhamowaniu chmury, aerozol przechodzi w obszar, gdzie krople doznają oporu wprost proporcjonalnego do ich prędkości – „reżim Stokesa”. Średnica chmury spełnia wówczas następujące równanie:

$$D_s(t) = \frac{2v_s}{\beta} (1 - e^{-\beta(t-t_s)}) + D_s \quad (5.19)$$

dla $t \geq t_s$, gdzie $\beta = \frac{\hat{\beta}}{m}$.

Równanie (5.19) po wprowadzeniu skali logarytmicznej dla czasu: $\tau = \ln(t - t_s)$ przyjmuje postać

$$D_s(\tau) = \frac{2v_s}{\beta} (1 - e^{-\beta e^\tau}) + D_s \quad (5.20)$$

gdzie:

$D_s(t)$ - (m), średnica chmury aerozolu wodnego w funkcji czasu (t (s)), reżim Stokesa,

$\hat{\beta}$ - (kg/s), współczynnik oporu aerodynamicznego kropli, która przemieszcza się w „obszarze Stokesa”,

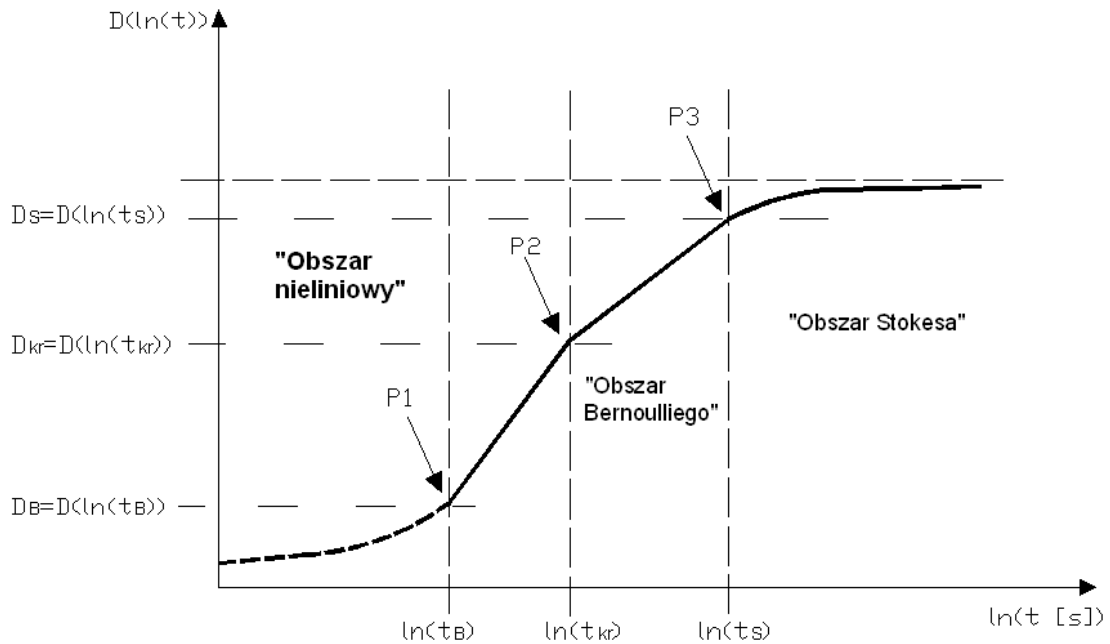
v_s - (m/s), prędkość, po której kropla (chmura aerozolu wodnego) przechodzi w „obszar Stokesa”, $v_s = v(t_s)$,

D_s - (m), średnica chmury aerozolu wodnego w chwili przejścia w „obszar Stokesa”, $D_s = D(t_s)$.

W dalszej części pracy przyjęto następujące oznaczenia (Rysunek 5.2):

- $P1 = (t_B, D(t_B))$ - punkt określający koniec „obszaru nieliniowy” kropel aerozolu wodnego, będący początkiem „obszaru Bernoulliego”;
- $P2 = (t_{kr}, D(t_{kr}))$ - punkt, dla którego obserwuje się zmianę współczynnika nachylenia wykresu $D = f(\ln(t))$, co spowodowane jest zjawiskiem nazywanym „kryzysem oporu” (zmiana współczynnika oporu aerodynamicznego kropli z wartości $c \approx 0,2$ do $c \approx 0,4$ [64] - przejście z obszaru nadkrytycznego do podkrytycznego). Punkt P2 znajduje się w „obszarze Bernoulliego”;
- $P3 = (t_s, D(t_s))$ - punkt, dla którego kończy się „obszar Bernoulliego” i zaczyna „obszar Stokesa”.

Wydaje się, iż występowanie punktu P2 na wykresie $D = f(\ln(t))$ uzależnione jest od tego, czy krople aerozolu uzyskają dostatecznie duże prędkości na końcu „obszaru nieliniowego”. Jeżeli będą one zbyt małe, wówczas ruch kropel nie obejmie krytycznej liczby Reynoldsa $Re \approx 3 \cdot 10^5$ [64] i będzie odbywał się tylko w obszarze podkrytycznym (obszar dla którego współczynnik oporu aerodynamicznego kropli ma wartości $c \geq 0,4$ - Rysunek 5.1). Dla dużych prędkości krople będą poruszać się najpierw w obszarze nadkrytycznym (obszar dla którego współczynnik oporu aerodynamicznego kropli ma wartości $c \approx 0,2$ - Rysunek 5.1), a następnie przejdą w obszar podkrytyczny.



Rysunek 5.2. Rozprzestrzenianie się chmury aerozolu wodnego – wynikające z rozważań teoretycznych.

P1 – punkt, w którym następuje przejście z „obszaru nieliniowego” do „obszaru Bernoulliego”,

P2 – punkt w obszarze Bernoulliego, w którym następuje „kryzys oporu” związany z gwałtowną zmianą współczynnika oporu aerodynamicznego kropli,

P3 – punkt, w którym kończy się „obszar Bernoulliego” i zaczyna „obszar Stokesa”

Z punktu widzenia rozważań niniejszej pracy nie jest zadaniem autora określenie procesu opisującego, co dzieje się bezpośrednio po eksplozji materiału wybuchowego, w jaki sposób przebiega proces detonacji materiału wybuchowego, czy rozpatrywanie zagadnienia rozprężania gazów powybuchowych. Autor zakłada, że część energii detonacji jest wydatkowana na fragmentację wody lub roztworu wodnego w kapsule wodnej, co ma pewne odzwierciedlenie w wynikach doświadczalnych (np. zmiana napięcia powierzchniowego użytej cieczy) i jest możliwe do oszacowania na podstawie uzyskanych wyników. Zagadnienia powstawania aerozolu wodnego i jego rozpędzanie w chwilach początkowych (aczkolwiek dobrze określonych w naszych badaniach) stanowi osobne, trudne do opisu zagadnienie [21].

6. ANALIZA WYNIKÓW

Próby przeprowadzane były w kilku etapach, ze względu na różne możliwości finansowania badań jak również ze względu na otrzymywanie kolejnych rezultatów, które stymulowały rozszerzenie prowadzonych badań.

Pierwsza część rozdziału: „Pomiary dotyczące fali uderzeniowej”, zawiera wyniki dotyczące rozkładu ciśnień podczas procesu powstawania chmury aerozolu wodnego.

W drugiej części rozdziału: „Pomiary dotyczące rozprzestrzeniania się chmury aerozolu wodnego”, zostały przedstawione wyniki i wnioski, które powstały w wyniku filmowania całego procesu formowania się aerozolu wodnego. Detonacje rejestrowane były za pomocą zwykłej kamery, która pracowała z częstotliwością 25 fps (kamera Sony DCR-SR30) oraz kamery szybkiej – 250 fps (kamera FASTCAM – Ultima 1024). Część pracy opisująca wyniki uzyskane zwykłą kamerą nazywana jest „pierwszym etapem doświadczeń”, z kolei wyniki uzyskane szybką kamerą to „drugi etap doświadczeń”. Podział ten jest zgodny z chronologią wykonywania doświadczeń.

W pierwszym etapie doświadczeń do produkcji aerozolu wodnego wykorzystywany był Emulinit. Jednym z celów było tu zbadanie ogólnych możliwości gaszenia pożarów aerozolem wodnym, a w szczególności:

- wyznaczenie wielkości worków,
- wyznaczenie optymalnych kształtów worków,
- wyznaczenie w jaki sposób ładunek wybuchowy powinien być umiejscowiony w kapsule,
- wyznaczenie masy ładunku wybuchowego (jego energii detonacji) jaki może być umieszczony w kapsułach,
- wyznaczenie powierzchni obszaru, który może zostać ugaszony prezentowaną metodą,
- wpływ domieszek do wody na powstawanie i rozprzestrzenianie się chmury oraz na zdolność gaśniczą,
- porównanie rozważań teoretycznych z danymi doświadczalnymi.

Drugi etap doświadczeń zawiera wyniki z prób, które filmowane były kamerą pracującą z częstotliwością 250 fps (kamera FASTCAM – ultima 1024, maksymalna zdolność rejestracji obrazu: 1000 fps). Do produkcji aerozolu wodnego wykorzystywany były trzy rodzaje materiałów wybuchowych: Emulinit, Saletrol, Plastik (parametry w Tabeli 6.1), które to posiadają szereg odmiennych parametrów [65]. Na tym etapie zbadane zostały te aspekty rozpatrywanych zagadnień, które, na podstawie wcześniejszych prób, uznane zostały za wymagające uściślenia. Przeprowadzono w tym celu m.in.:

- próby (doświadczenia) potwierdzające przydatności różnych materiałów wybuchowych do produkcji aerozolu wodnego,
- próby (doświadczenia), w których woda miała zmniejszony współczynnik napięcia powierzchniowego,
- próby (doświadczenia), których celem było zbadanie opóźnień w odpaleniu części ładunków wybuchowych dla uzyskania maksymalnej średnicy chmury,
- pomiary wielkości ciśnienia i prędkości fali uderzeniowej towarzyszącej detonacji ładunku wybuchowego umieszczonego wewnątrz kapsuł.

Część podrozdziału 6.2 poświęcona jest weryfikacji hipotezy przejścia kropel aerozolu wodnego z obszaru nadkrytycznego do podkrytycznego tzw. „kryzys oporu” (Rysunek 5.1).

Podrozdział 6.3 („Powstawanie i rozprzestrzenianie się chmury aerozolu wodnego podczas zrzutu kapsuły”) poświęcony jest zagadnieniu powstania i rozprzestrzeniania się chmury aerozolu wodnego podczas zrzutu kapsuły wodnej z helikoptera. Do produkcji aerozolu wodnego wykorzystywany był Emulinit.

Podrozdział 6.4 zawiera porównanie wyników dotyczących fali uderzeniowej oraz chmury aerozolu wodnego.

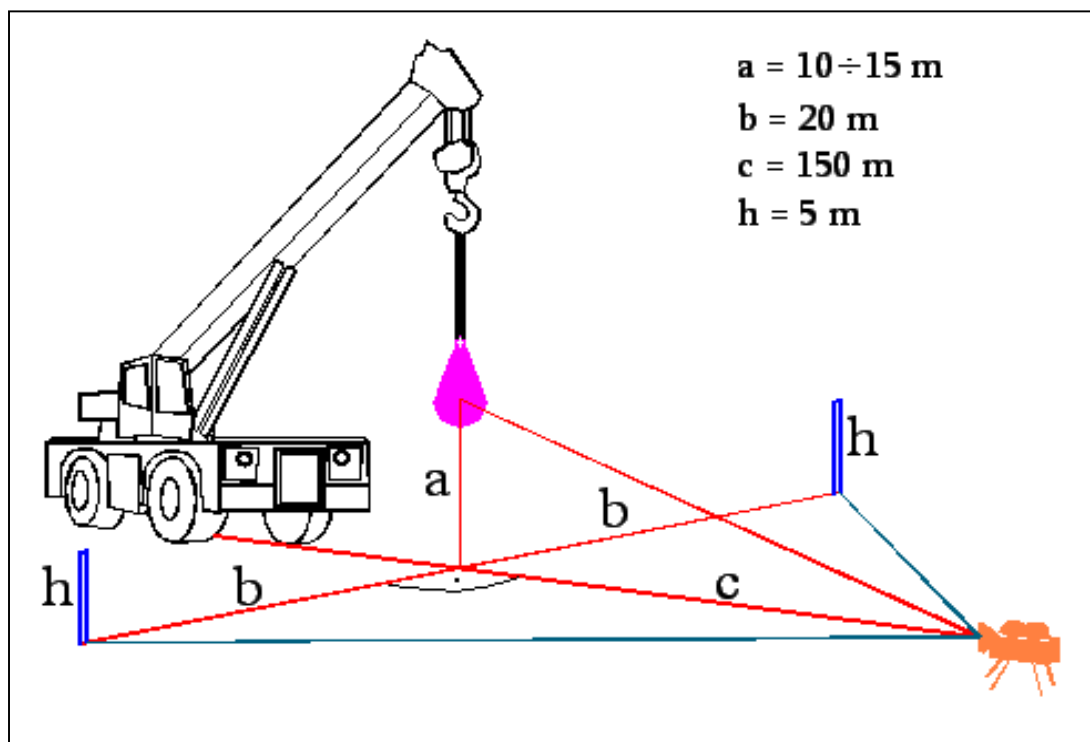
Podrozdział 6.5 poświęcony jest metodologii pomiaru wielkości kropel aerozolu wodnego oraz uzyskanym wynikom.

W podrozdziale 6.6 oszacowana jest ilość energii, jaka została zużyta na fragmentację wody zgromadzonej w kapsule wodnej w oparciu o wyniki, które przedstawione są w poprzednim podrozdziale.

6. ANALIZA WYNIKÓW

Stanowisko do badań składało się z dźwigu (Rysunek 6.1), który na wysięgniku, za pośrednictwem liny, miał podczepioną kapsułę wodną. Jej wysokość, po wstępnych próbach weryfikujących, ustalono na 10 do 12 metrów nad poziomem terenu. Pomiar masy kapsuły odbywał się przy użyciu wagi umieszczonej w dźwigu lub wagi zamontowanej na linie, do której przymocowano obiekt badań. Dokładność odczytu masy w pierwszym przypadku to +/- 25 kg, w drugim +/- 20 kg.

Każda eksplozja rejestrowana była kamerą ma tle skali, co umożliwiało wyznaczenie średnicy chmury w zależności od czasu. Przykładowe klatki filmu z jedną z takich prób przedstawione są na Rysunku 2.3, natomiast uzyskany wynik w postaci wykresu przedstawia Rysunek 6.1.10. W pierwszym etapie doświadczeń użyta została standardowa kamera, wykonująca 25 zdjęć na sekundę. Szacuje się (Załącznik nr 2), że dokładność tego typu pomiaru to $\Delta t = \pm 40$ ms dla odczytu czasu aczkolwiek po przeanalizowaniu bardzo wielu klatek filmu można uznać, że rzeczywista dokładność w tego typu doświadczeniu wynosi $\Delta t = \pm 20$ ms oraz dla odczytu odległości błąd szacujemy na $\Delta D = \pm 2$ m. Błędy pomiarowe dotyczące wyznaczania średnicy chmury aerozolu wodnego, dla początkowych klatek filmu są znacznie mniejsze od $\Delta D = \pm 2$ m. W pierwszym etapie doświadczeń wykorzystywany był ładunek wybuchowy Emulinit. Drugi etap doświadczeń filmowany był kamerą pracującą z częstotliwością 250 fps (oszacowanie błędu pomiarowego znajduje się w Załączniku nr 2). Wykorzystano tu trzy różne materiały wybuchowe: Emulinit, Saletrol, Plastik (Tabela 6.1).



Rysunek 6.1. Schematyczny widok stanowiska badań

Średnice chmury aerozolu odczytane z poszczególnych klatek filmu zostały naniesione, jako funkcja czasu, na wykres. Wykorzystywano do tego celu oprogramowanie służące do wyznaczania przemieszczeń, szybkości i przyspieszeń obiektów na poszczególnych klatkach filmu – program Viana (Automatise VideoANALyse 3.64 ohneLog, autor Thomas Kersting – Universität Essen, Didaktik der Physik). Pomiar średnicy chmury opierał się na wyznaczeniu odległości pomiędzy zewnętrznymi obrysami elipsy, której rozmiary uśredniają położenie kropeł aerozolu – Rysunek 6.2.



Rysunek 6.2. Pomiar średnicy chmury aerozolu wodnego – wyznaczana jest odległość między zewnętrznymi „obrysami” elipsy

Doświadczenia, mające na celu analizę powstawania i rozprzestrzeniania się chmury aerozolu wodnego, z wykorzystaniem metody określania średnicy aerozolu w funkcji czasu, przeprowadzono dla różnych parametrów związanych z wybuchowym wytwarzaniem aerozolu:

- wielkości kapsuły wodnej (pojemności),
- masy ładunku wybuchowego umieszczonego w kapsule wodnej (energii eksplozji),
- rozmieszczenia ładunku wybuchowego wewnątrz kapsuły wodnej,
- rodzaju ładunku wybuchowego umieszczanego wewnątrz kapsuły wodnej,
- rodzaju cieczy pod względem napięcia powierzchniowego.

Cały cykl badań to około 150 prób, które wykonywano w różnych konfiguracjach. Pojemności kapsuł wynosiły od 600 do 1500 dm³. Rozmieszczenie ładunku wybuchowego przyjęto w dwóch wariantach: konfiguracja cylindryczna (Rysunek 2.1) i sferyczna (Rysunek 2.2). Masa ładunku wybuchowego odpowiadały energiom od około 4 MJ do 33 MJ. Podczas prób użyto trzech rodzajów ładunków wybuchowych: Emulinitu (Emulsyjny MW Emulinit 2), Plastik (materiał wybuchowy

6. ANALIZA WYNIKÓW

plastyczny MW MPW C-4) oraz Saletrolu (ANFO), których energia została przeliczona na odpowiednią masę ładunku wg parametru „idealna praca wybuchu” (patrz Tabela 6.1). W pracy prędkość detonacji jak też inne parametry materiałów wybuchowych zostały zaczerpnięte z materiałów katalogowych producentów.

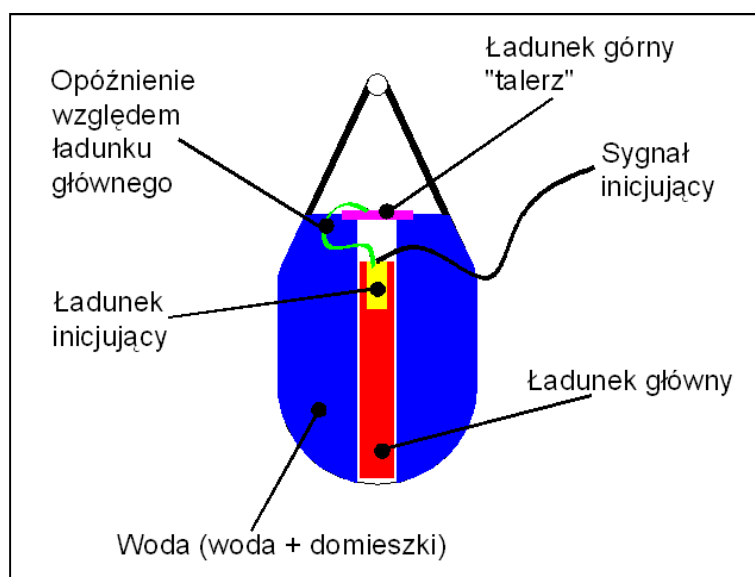
Tabela 6.1. Parametry materiałów wybuchowych użytych w próbach (w pierwszym etapie doświadczeń użyto Emulinitu, w drugim użyto Emulinitu, Saletrolu i Plastik)u)

Nazwa parametru	Plastyczny MW MPW C-4	Emulsyjny MW Emulinit 2	Saletrol (ANFO)	Ładunek inicjujący Ergodyn 37 SE
Prędkość detonacji [m/s]	7733	5460	2140	6700
Wydęcie w bloku ołowianym [cm ³]	370	306	198	360
Względna zdolność do wykonania pracy [% odnośnej siły heksogenu]	73	63	57	63
Gęstość [g/cm ³]	1,5	1,26	0,9	1,46
Objętość właściwa produktów wybuchu [dm ³ /kg]	843,8	853,8	972,6	830,5
Ciepło wybuchu [kJ/kg]	5089,2	2746,4	3552,5	3547,3
Koncentracja energii [kJ/dm ³]	7633,8	3460,5	3268,3	4930,7
Temperatura wybuchu [K]	3770	2249	2653	2915
Ciśnienie wybuchu [MPa]	1770,4	897,6	832,8	1248,4
Idealna praca wybuchu [kJ/kg]	4394,1	2326,6	2933,5	2951,2
Energia właściwa [kJ/kg]	1180,3	712	957,3	868,1

Na podstawie rozważań teoretycznych oraz szeregu prób doświadczalnych wypracowany został model kapsuły wodnej, której przekrój przedstawiony jest na Rysunku 6.3. Model ten jest złożeniem konfiguracji cylindrycznej i sferycznej (Rysunek

6. ANALIZA WYNIKÓW

2.1 i 2.2) – ze znaczną przewagą konfiguracji cylindrycznej. Ładunek główny detonowany jest przy pomocy pobudzacza („ładunek inicjujący”), który odpalony zostaje przez przewód do niego doprowadzony. Docelowo rozwiązanie to będzie zmienione – detonacja musi odbywać się przy pomocy specjalnie skonstruowanego zapalnika z układem programowalnym, który zdetonuje kapsułę po zadanym czasie. Umieszczenie w kapsule „ładunku górnego” (Rysunek 6.3) ma na celu zahamowanie ekspansji chmury aerozolu w niepożądanym kierunku (przeciwnym do źródła ognia). Detonacja „ładunku górnego” powinna odbyć się z kilku milisekundowym opóźnieniem w stosunku do ładunku głównego. Użyta nazwa „talerz” pochodzi od tego, że ładunek ten umieszczony jest w pojemniku w kształcie dysku. Kapsuła wodna ma wydzieloną przestrzeń na osiowe umieszczenie ładunku wybuchowego. Przestrzeń ta oddzielona jest od wody zgromadzonej w kapsule przy pomocy foliowego rękawa. Ze względu, że część materiałów wybuchowych ma gęstość mniejszą od wody, konieczne było przymocowywanie spodu materiału wybuchowego do dna kapsuły. Jednocześnie rozwiązanie to powodowało, iż usytuowanie ładunku względem wody było stabilniejsze.



Rysunek 6.3. Wypracowany podczas testów model kapsuły wodnej (przekrój osiowy) - opis w tekście

6.1 **POMIARY DOTYCZĄCE FALI UDERZENIOWEJ**

Falą uderzeniową nazywamy zaburzenie rozchodzące się najczęściej w gazie (lecz także w cieczy lub ciele stałym), mające postać powierzchni (tzw. powierzchni nieciągłości), na której występuje skokowa zmiana parametrów ośrodka: wzrost ciśnienia, gęstości i temperatury oraz spadek prędkości. Przez skokową zmianę należy rozumieć zmianę bardzo gwałtowną (nie dotyczy to gazów rozrzedzonych), zachodzącą na odcinku o długości rzędu drogi swobodnej cząsteczki ośrodka. Fale uderzeniowe powstają przy nagłym zaburzeniu wywołanym np. detonacją lub uderzeniem pioruna albo przy stacjonarnym opływie ciała stałego przez naddźwiękowy strumień gazu. Fala uderzeniowa w gazie przemieszcza się zawsze z prędkością większą niż prędkość dźwięku w tym gazie.

Celem opisywanych badań był pomiar prędkości fali uderzeniowej i ciśnienia w funkcji odległości od centrum eksplozji dla kilku różnych rodzajów materiałów wybuchowych, energii i wielkości kapsuły wodnej oraz weryfikacja hipotez dotyczących wytwarzania aerozolu wodnego metodą wybuchową.

Stanowisko pomiarowe wyposażone zostało w czujniki ciśnienia umieszczone wzdłuż osi rozprzestrzeniania się fali uderzeniowej. Na Rysunku 6.1.2 przedstawiony jest schemat ich rozmieszczenia - usytuowania względem kapsuły wodnej.

Aparatura wykorzystywana do pomiarów parametrów fali uderzeniowej składała się z czujnika zwarcowego, wyzwalającego pomiar; czterech piezoelektrycznych czujników ciśnienia typu ICP, układu kondycjonowania sygnału o regulowanej wartości wzmocnienia oraz komputera przemysłowego PXI z zainstalowanym systemem czasu rzeczywistego LabVIEW RT, wyposażonego w odpowiednią kartę pomiarową. Aplikacja pomiarowa została przygotowana tak, że wyzwolenie pomiaru następowało w momencie eksplozji materiału wybuchowego. Parametry pomiaru: ilość zebranych próbek - 100 tys. i częstotliwość próbkowania - 500 tysięcy próbek na sekundę, pozwoliły na pomiar odcinka czasowego 200 ms, z rozdzielczością 2 μ s. Analiza uzyskanych przebiegów pozwoliła na określenie ciśnienia oraz prędkości rozchodzenia się fali uderzeniowej.

6. ANALIZA WYNIKÓW



Rysunek 6.1.1A. Czujnik piezoelektryczny (czujniki ciśnienia dynamicznego typu IPC firmy EC TEST SYSTEMS, symbole 137A21, 137A22, 137A23, 137A24)

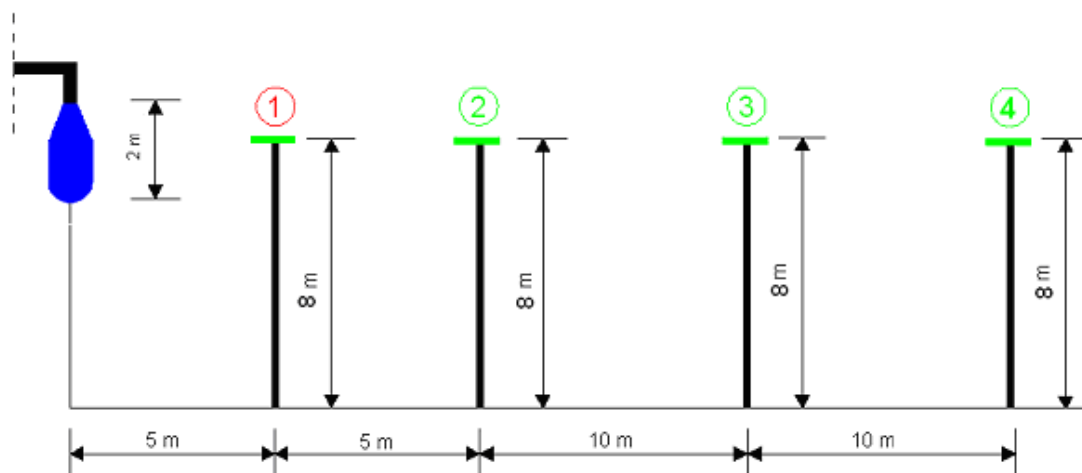
Tabela 6.1.1. Parametry czujników piezoelektrycznych użytych do pomiarów

Numer czujnika	Czułość (mV/kPa)	Maksymalne ciśnienie (MPa)	Rozdzielczość (kPa)
1	0,145	34,5	0,69
2	2,9	34,5	0,001
3	14,5	6,9	0,069
4	14,5	6,9	0,069



Rysunek 6.1.1B. Komputer przemysłowy PXI użyty w drugim etapie doświadczeń – pomiar ciśnienia na drodze fali uderzeniowej

6. ANALIZA WYNIKÓW



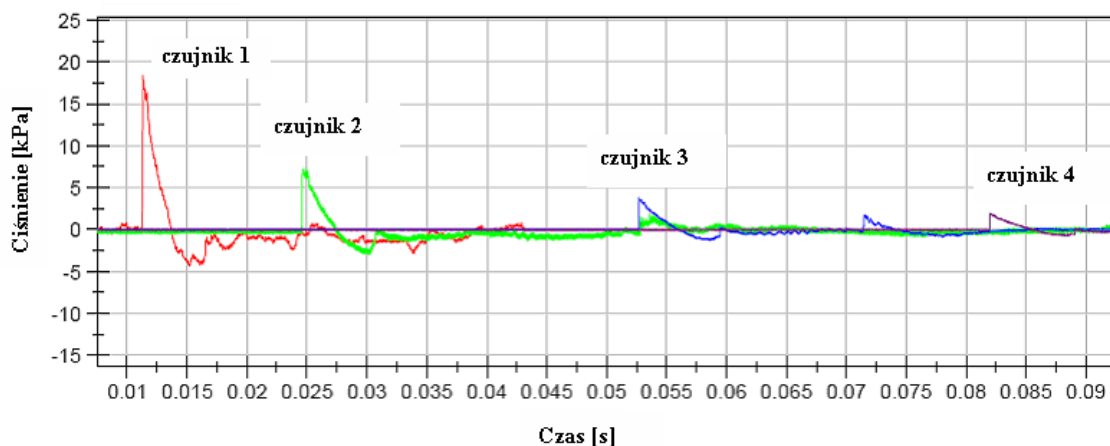
Rysunek 6.1.2. Schemat rozmieszczenia czujników ciśnienia podczas drugiego etapu doświadczeń; 1, 2, 3, 4 – numery czujników ciśnienia



Rysunek 6.1.3. Stanowisko pomiarowe - czujniki ciśnienia umieszczone na wysokości 8 m nad ziemią

6. ANALIZA WYNIKÓW

Przykładowa seria danych uzyskanych dla jednej z prób przedstawiona jest na Rysunku 6.1.4. Wyniki te ukazują, iż rozprzestrzenianie się fali uderzeniowej odbywa się z prędkością większą do prędkości dźwięku.



Rysunek 6.1.4. Przykładowa seria danych (przebieg ciśnień fali uderzeniowej) uzyskanych podczas rejestracji eksplozji ładunku wybuchowego wewnątrz kapsuły wodnej; (oznaczenia czujników zgodne z Rysunkiem nr 6.1.2)

Na podstawie zgromadzonych danych zauważa się następującą charakterystykę rozprzestrzeniania się fali uderzeniowej: fala powstała podczas detonacji ładunku wybuchowego odpowiedzialna jest za nagły wzrost ciśnienia w obszarze każdego czujnika (nadcisnienie), następnie następuje zmniejszenie ciśnienia (podcisnienie) i powrót do stanu równowagi (ciśnienia atmosferycznego).

Na podstawie wykresów (Rysunek 6.1.4) można określić średnie prędkości fali uderzeniowej na odcinkach pomiędzy workiem a czujnikiem nr 1 oraz między kolejnymi czujnikami. Odstęp czasu pomiędzy rejestracją czoła fali uderzeniowej w kolejnych punktach pomiarowych dla przebiegu z rysunku wynosi odpowiednio 11, 13, 27 i 30 ms co odpowiada średnim prędkościom $\bar{v}_{01} \approx 443 \text{ ms}^{-1}$, $\bar{v}_{12} \approx 375 \text{ ms}^{-1}$, $\bar{v}_{23} \approx 356 \text{ ms}^{-1}$ i $\bar{v}_{34} \approx 341 \text{ ms}^{-1}$.

W zależności od rodzaju zastosowanego ładunku wybuchowego, jego energii oraz wielkości worka maksymalne wartości nadcisnienia wahają się od 9 do 50 kPa, a maksymalne prędkość fali uderzeniowej od 360 do 525 m/s. W odległości 30 metrów od centrum eksplozji nadcisnienie ma już wartość rzędu 2 ÷ 3 kPa, a prędkość fali

6. ANALIZA WYNIKÓW

uderzeniowej obniża się do prędkości dźwięku ok. 340 m/s (prędkość dźwięku w powietrzu).

Tabela 6.1.2. Średnie wartości ciśnienia na poszczególnych czujnikach w odległości 5, 10, 20 i 30 metrów od centrum eksplozji oraz średnie wartości prędkości czoła fali uderzeniowej na odcinkach między poszczególnymi czujnikami dla wybranych wielkości worków, ładunków i energii

Pojemność worka (dm ³)	Materiał wybuchowy	Energia (kJ)	Prędkość (m/s) na czujnikach				Ciśnienie (kPa) na czujnikach			
			1	2	3	4	1	2	3	4
600	EMULINIT	10784	384	372	357	330	21,7	8,4	4,6	2,3
1500	EMULINIT	10784	371	372	357	332	20,7	9,7	4,7	2,4
1200	EMULINIT	10784	437	370	353	338	27,6	9,0	4,7	2,3
600	SALETROL	4384	417	373	354	328	17,2	8,6	3,9	2,1
600	SALETROL	7293	389	373	358	331	22,1	9,3	4,8	2,2
600	SALETROL	10784	390	374	358	330	21,7	8,3	5,5	2,5
1500	SALETROL	20092	377	376	362	334	19,3	10,3	6,3	3,1
1500	EMULINIT	20092	399	362	357	334	13,8	7,6	4,5	2,4
1500	PMW	20092	385	370	358	333	37,2	9,3	5,5	2,8

Oszacowanie błędu pomiaru prędkości dokonane zostało na podstawie wzoru $v = s \cdot t^{-1}$, gdzie s – odległość między kolejnymi punktami pomiarowymi, t – odstęp czasu pomiędzy rejestracją czoła fali uderzeniowej w kolejnych punktach pomiarowych. Błąd pomiaru średniej prędkości fali uderzeniowej określono metodą różniczki zupełnej:

$$\Delta v = \left| \frac{\partial v}{\partial t} \right| \Delta t + \left| \frac{\partial v}{\partial s} \right| \Delta s, \quad (6.1.1)$$

gdzie $\Delta t = 2\mu s$ - błąd pomiaru czasu, $\Delta s = 0,2m$ - błąd pomiaru odległości między punktami pomiarowymi.

6. ANALIZA WYNIKÓW

Na podstawie powyższych zależności obliczono błąd pomiaru prędkości, który wyniósł $\Delta v = 7 \div 14$ m/s.

Oszacowanie błędu pomiaru ciśnienia dokonane zostało na podstawie wzoru $p = U \cdot K^{-1}$, gdzie U – zmierzone napięcie, K – czułość zestawu złożonego z czujnika piezoelektrycznego i układu kondycjonowania sygnału.

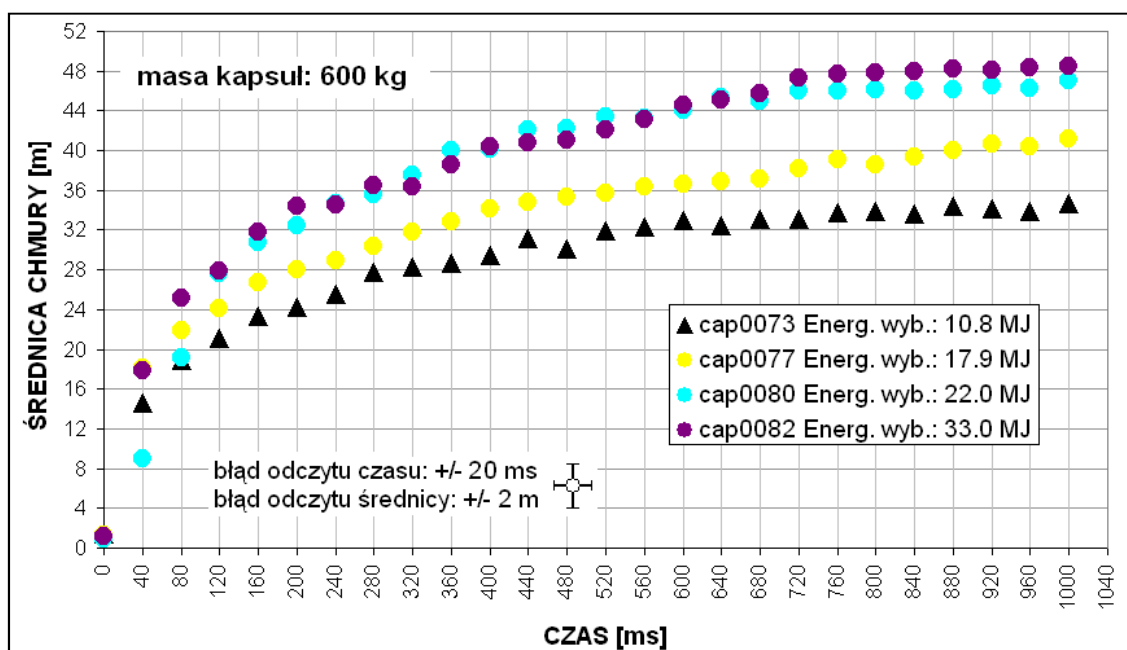
Błąd pomiaru ciśnienia:

$$\Delta p = \left| \frac{\partial p}{\partial U} \right| \Delta U + \left| \frac{\partial p}{\partial K} \right| \Delta K, \quad (6.1.2)$$

W obliczeniach uwzględniono tylko pierwszy składnik ze względu na pomijalnie małą wartość drugiego. Błąd pomiaru napięcia $\Delta U = 40$ mV; czułość $K_1 = 14,5$ mV/kPa; $K_2 = 29$ mV/kPa; $K_3 = K_4 = 145$ mV/kPa. Błąd pomiaru wyniósł 2,6 kPa dla czujnika nr 1; 1,4 kPa dla czujnika nr 2; 0,3 kPa dla czujników nr 3 i 4. (schemat rozmieszczenia czujników przedstawiony jest na Rysunku 6.1.2).

6.2 POMIARY DOTYCZĄCE ROZPRZESTRZENIANIA SIĘ CHMURY AEROZOLU WODNEGO

Średnica chmury aerozolu wodnego dla kapsuł o pojemności 600 dm^3 jest silnie zależna od energii wybuchu ładunku wybuchowego (Rysunek 6.2.1). Sukcesywne jego zwiększanie od około 10 MJ do 22 MJ przekłada się w widoczny sposób na większy promień aerozolu. Odstępstwem od tej tendencji jest energia 33 MJ, której odpowiada prawie ten sam promień co energii 22 MJ. Jest to wyraźny dowód na tezę, stwierdzającą, że istnieje pewna ograniczona zdolność rozprzestrzeniania się chmury aerozolu wodnego (nazywana w pracy „efektem przedmuchania”). Dla kapsuł o pojemności 600 dm^3 granicą tą jest średnica około 48 m.



Rysunek 6.2.1. Zależność średnicy chmury aerozolu wodnego od czasu rozprzestrzeniania; energie wybuchu od 10,8 MJ do 33,0 MJ; kapsuła o pojemności 600 dm^3 ; woda bez dodatku proszku

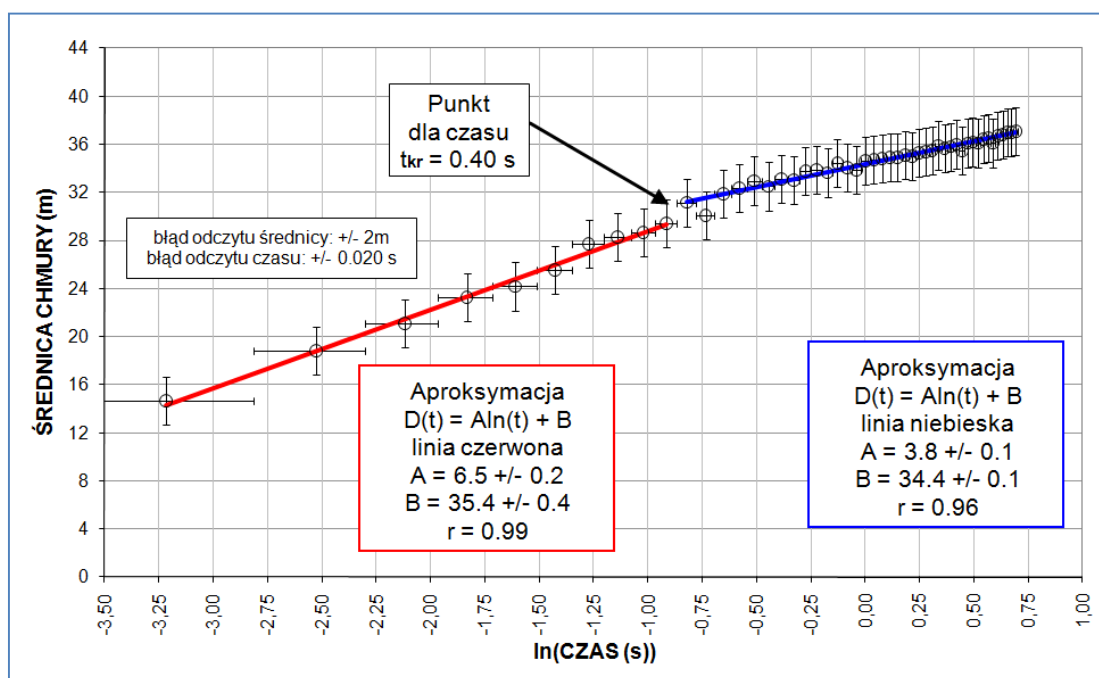
Wykresy zależności średnicy aerozolu wodnego w funkcji czasu przedstawionego na skali logarytmicznej, dla kapsuł o masie 600 kg, ujawniają

6. ANALIZA WYNIKÓW

występowanie dwóch obszarów rozprzestrzeniania się chmury: obszar nadkrytyczny i podkrytyczny – wg hipotezy postawionej w rozdziale 5 (Rysunek 6.2.2) – punkt P2 w obszarze Bernoulliego. Przejście przez niego przypada na początkowe chwile ekspansji – czasy rzędu 200 ms do 500 ms. Dla obydwu obszarów można wyznaczyć aproksymujące funkcje liniowe z dosyć wysokim „współczynnikiem dopasowania” r – rzędu 0,98. Współczynnik r , w rozdziale 6 pracy, wyznaczony jest na podstawie następującego wzoru [66]:

$$r = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_{\text{aproxymacyjne}(i)} - y_{\text{zmierzone}(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (y_{\text{zmierzone}(i)} - y_{\text{średnia_arytmetyczna}})^2} \quad (6.2.1)$$

Różnice w występowaniu punktu przejściowego P2, dla różnych doświadczeń (np. Rysunek 6.2.2, mieszczą się w granicy błędu pomiarowego i pozwalają przypuszczać, że wskazują na to samo zjawisko fizyczne.



Rysunek 6.2.2. Zależność średnicy chmury aerozolu wodnego od czasu przedstawionej na skali logarytmicznej, zarejestrowana dla kapsuły o pojemności 600 dm³ i energii wybuchu wynoszącej 10,8 MJ (cap0073). P2 – punkt w obszarze Bernoulliego, w którym następuje „kryzys oporu” związany z gwałtowną zmianą współczynnika oporu aerodynamicznego kropli

6. ANALIZA WYNIKÓW

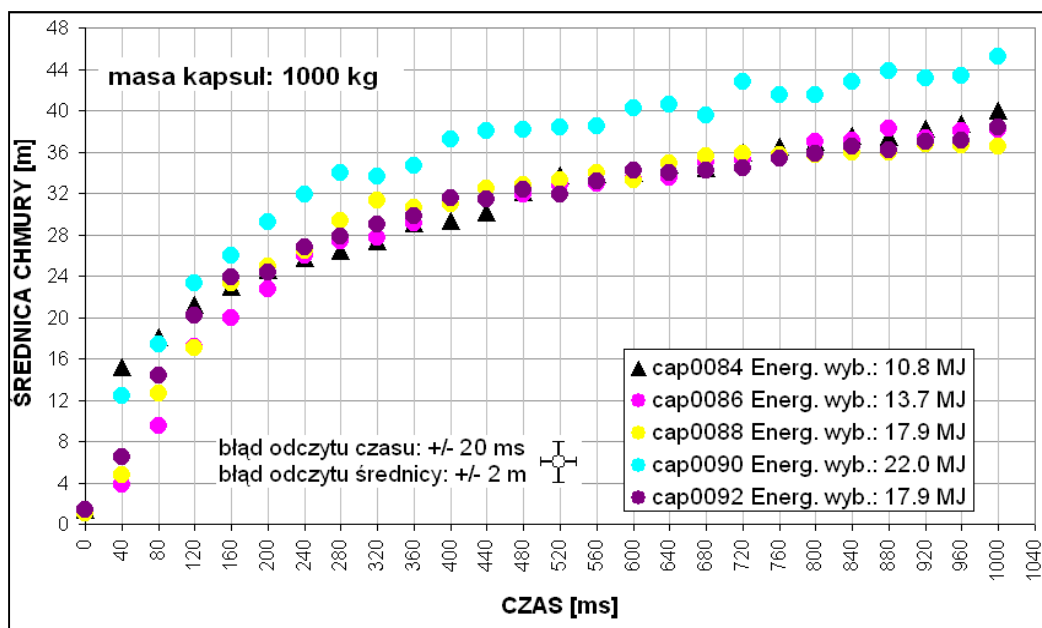
Dla kapsuł o pojemności 1000 dm^3 (Rysunek 6.2.3) przeprowadzone zostały próby z ładunkami wybuchowymi (Emulinit) o energii od około 10 MJ do 22 MJ. Zarzucone zostały doświadczenia z użyciem większych energii ze względu na „efekt przedmuchiania” oraz negatywne skutki silnych eksplozji, które prowadziły do uszkodzeń na stanowisku doświadczalnym. W takich warunkach uzyskano zasięgi chmury od 36 m do 46 m (Rysunek 6.2.3). Wykresy zależności średnicy od czasu (skala logarytmiczna) nie ujawniają już tak wyraźnego punktu załamania – P2 (w odniesieniu do kapsuł 600 kg). Można wręcz cały obszar rozprzestrzeniania dopasować do jednej funkcji liniowej z bardzo wysokim „współczynnikiem dopasowania” r : rzędu 0,99 (obliczone wg wzoru (6.2.1)). Przykładowy wykres z jednej z takich prób przedstawiony jest na Rysunku 6.2.4. Odpowiednik punktu przejścia między dwoma obszarami (nadkrytycznym i podkrytycznym), który jest wyraźnie widoczny dla prób o masie wody 600 kg, można tu również zauważyć. Nie jest on jednak tak dobrze widoczny jak w poprzednich próbach, a zważywszy na wielkość błędu pomiarowego, nie można na jego podstawie wyciągać daleko idących wniosków.

Uwidacznianie się punktu przejścia między obszarem podkrytycznym i nadkrytycznym (P2), może być związane z szybkością kropeł aerozolu, jaki uzyskują krople na końcu etapu „nieliniowego” (Rysunek 5.2). Hipoteza dotycząca tego zjawiska przedstawiona jest poniżej:

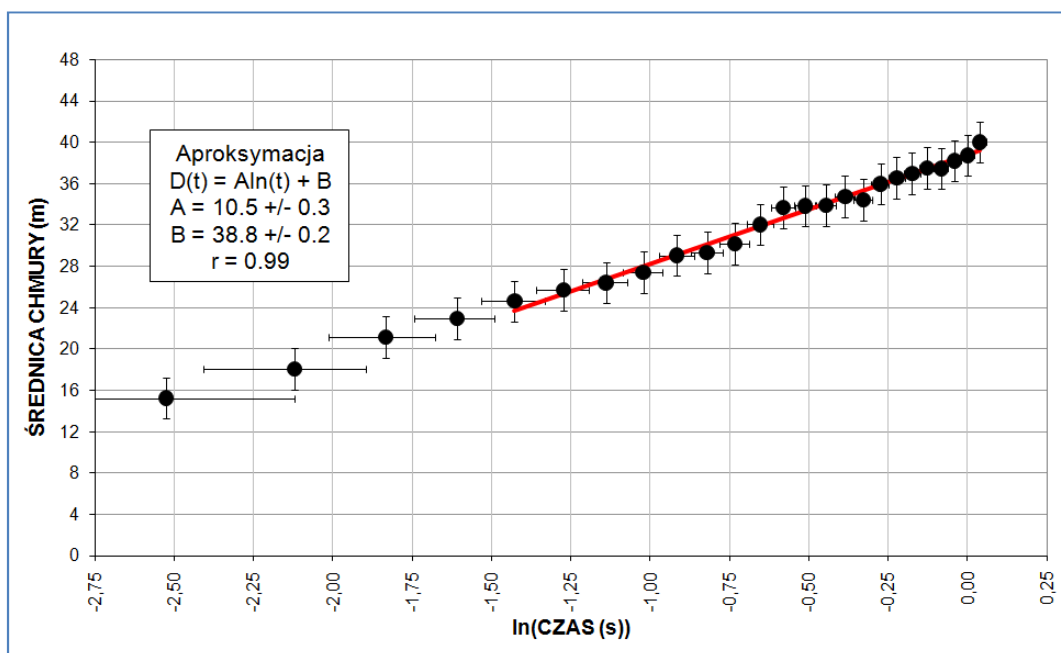
- Duże ładunki wybuchowe, w odniesieniu do ilości wody zgromadzonej w kapsule, powodują nadanie kropełkom aerozolu dużych prędkości: $Re > 3 \cdot 10^5$ - obszar nadkrytyczny. Drobiny te, w trakcie dalszej ekspansji, wyhamowywane są do prędkości podkrytycznych $Re < 3 \cdot 10^5$. Przejście między obszarem nadkrytycznym i podkrytycznym uwidacznia się wówczas na wykresie $D = f(\ln(t))$ w postaci punktu P2.
- Małe ładunki wybuchowe, w odniesieniu do ilości wody zgromadzonej w kapsule, powodują nadanie kropełkom aerozolu małych prędkości: $Re < 3 \cdot 10^5$ - obszar podkrytyczny. Dalsza ekspansja chmury odbywa się cały czas w tym samym obszarze, a zatem nie ma nagłej zmiany współczynnika nachylenia wykresu $D = f(\ln(t))$ - punkty doświadczalne można dopasować do jednej funkcji liniowej.

6. ANALIZA WYNIKÓW

- o Dla kapsuł wodnych o masie 600 kg, energia wybuchu wystarcza do nadania początkowych prędkości większych od prędkości, dla których liczba Reynoldsa $Re > 3 \cdot 10^5$.



Rysunek 6.2.3. Zależność średnicy chmury aerozolu wodnego od czasu rozprzestrzeniania; energie wybuchu od 10,8 MJ do 22,0 MJ; masa kapsułek 1000 kg; woda bez dodatku proszku

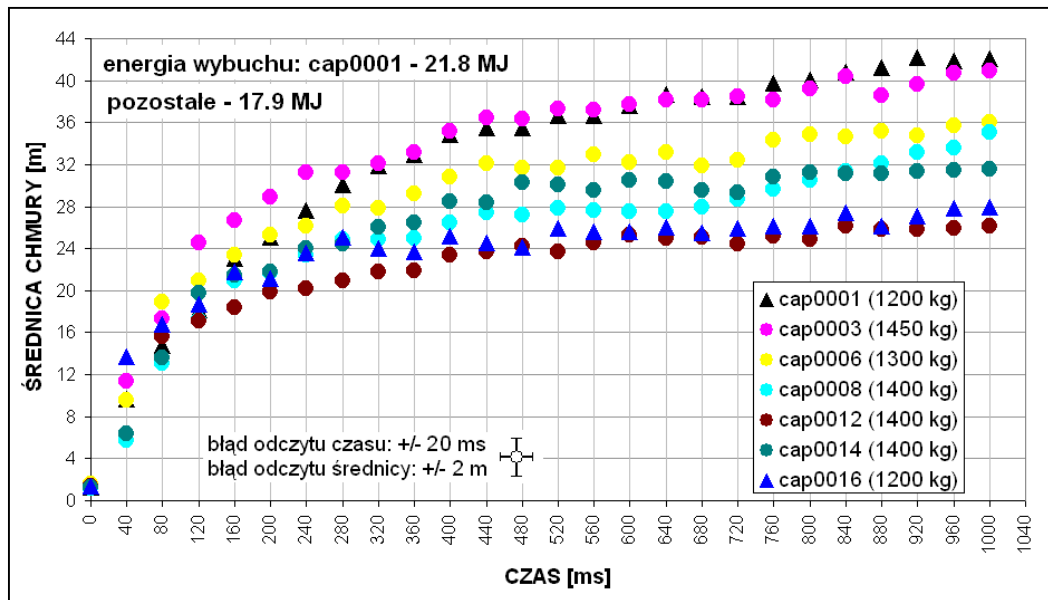


Rysunek 6.2.4. Zależność średnicy chmury aerozolu wodnego od czasu przedstawionej na skali logarymicznej, zarejestrowana dla kapsuły o pojemności 1000 dm^3 i energii wybuchu wynoszącej 10,8 MJ (cap0084). Nie uwidoczniiony punkt P2, w którym występuje „kryzys oporu”

6. ANALIZA WYNIKÓW

Kolejną badaną grupę stanowiły kapsuły o masach od 1200 kg do 1450 kg. Wykorzystywano tu ładunek wybuchowy (Emulinit) o tej samej energii: około 18 MJ. Dodatkowo w kapsułach umieszczane były dodatki w postaci różnego rodzaju proszków wspomagających proces gaszenia ognia (od 75 kg do 100 kg). W grupie tej umieszczona została jeszcze jedna kapsuła, która posiada odmienne parametry (cap0001): masa 1200 kg, energia wybuchu około 22 MJ i bez dodatku proszku.

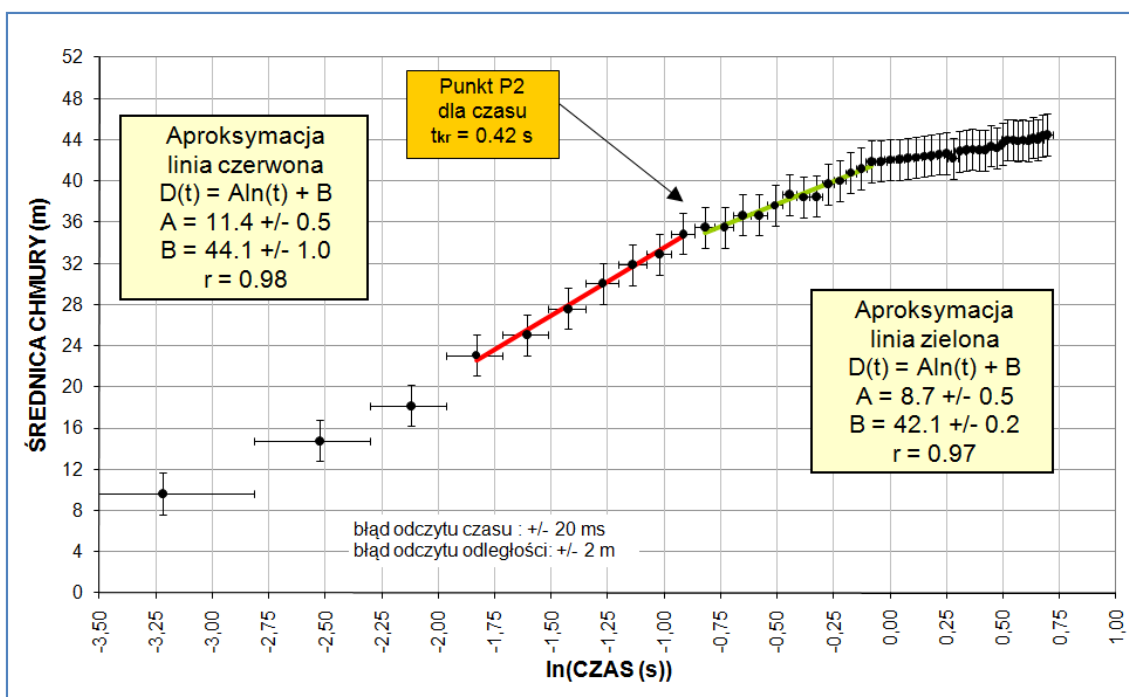
Dla grupy tej zauważono duże różnice w zasięgu chmury, które wynosiły od 26 m do 41 m (Rysunek 6.2.5). Ponadto nie stwierdzono tu występowania określonej tendencji polegającej na występowaniu związku między zasięgiem i masą kapsuły. Dla przykładu kapsuły o masie 1400 kg uzyskały średnice chmury wynoszące: 40 m (cap0008), 26 m (cap0012), 36 m (cap0014). Jest to dowód na to, iż transfer energii od ładunku do wody był różny dla każdego z tych trzech przypadków. Pierwszym powodem tej sytuacji jest niejednakowe rozmieszczenie ładunku wybuchowego w omawianych kapsułach, drugim natomiast wpływ domieszek wspomagających gaszenie. Należy więc wypracować taki sposób mocowania ładunku, który spowodowałby jednakowe ułożenie materiałów wybuchowych wewnątrz pojemnika z wodą.



Rysunek 6.2.5. Zależność średnicy chmury aerozolu wodnego od czasu rozprzestrzeniania; energia wybuchu 20,1 MJ dla cap0001, w pozostałych przypadkach 17,9 MJ; masa kapsuł od 1200 kg do 1450 kg; dla wszystkich prób oprócz cap0001 woda z dodatkiem proszku (cap0003, cap0006, cap0008, cap0010, cap0012, cap0014 dodano 75 kg, cap0016 dodano 100 kg)

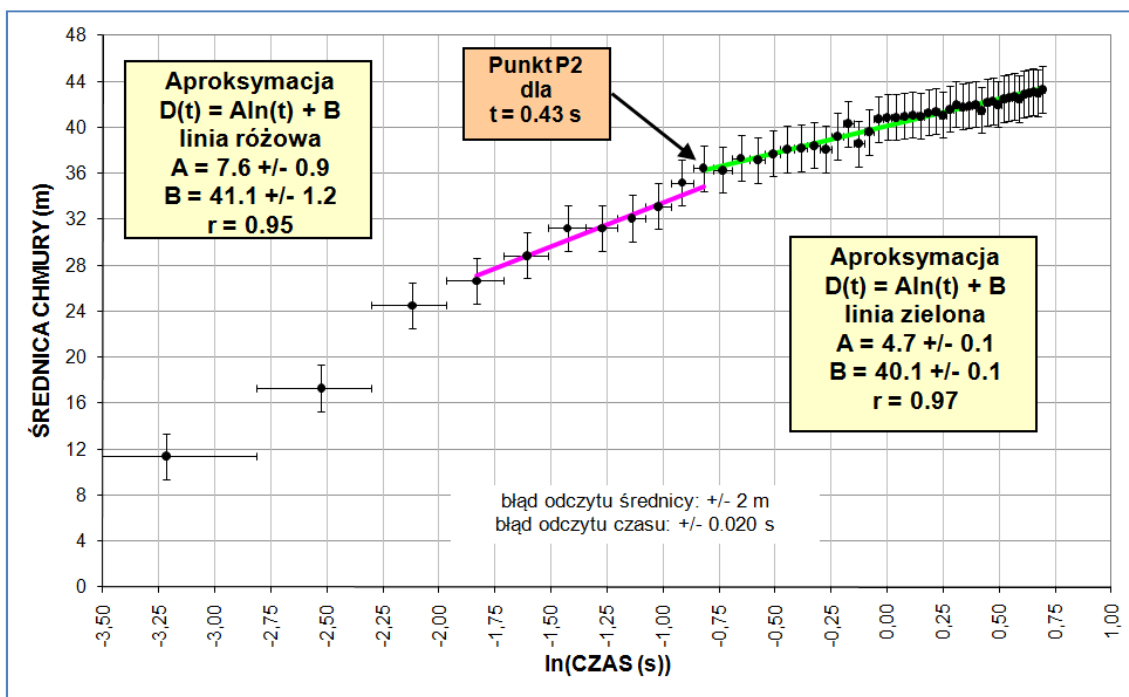
6. ANALIZA WYNIKÓW

Dla kapsuł o masach od 1200 kg do 1450 kg występowanie punktu P2 również można zauważyć. W niektórych próbach jest on wyraźnie zauważalny – Rysunek 6.2.7, a na innych mniej widoczny. Występuje tu analogiczna sytuacja jak w doświadczeniach z kapsułami 600 kg oraz 1000 kg. Nie ma wyraźnego związku z występowaniem tego punktu w zależności od energii wybuchu, wielkości kapsuły czy zastosowanych dodatków do wody.



Rysunek 6.2.6. Zależność średnicy chmury aerozolu wodnego od czasu przedstawionego na skali logarytmicznej, zarejestrowana dla kapsuły o pojemności 1200 dm^3 i energii wybuchu wynoszącej 21 MJ (cap0001); woda bez dodatków. P2 – punkt w obszarze Bernoulliego, w którym następuje „kryzys oporu” związany z gwałtowną zmianą współczynnika oporu aerodynamicznego kropli

6. ANALIZA WYNIKÓW



Rysunek 6.2.7. Zależność średnicy chmury aerozolu wodnego od czasu przedstawionego na skali logarymicznej, zarejestrowana dla kapsuły o pojemności 1450 dm^3 i energii wybuchu wynoszącej $17,9 \text{ MJ}$ (cap0003); woda z dodatkiem 75 kg proszku wspomagającego gaszenie pożaru. P2 – punkt w obszarze Bernoulliego, w którym następuje „kryzys oporu” związany z gwałtowną zmianą współczynnika oporu aerodynamicznego kropli

Pierwszy etap badań uwidocznił konieczność przeprowadzenia doświadczeń przy użyciu szybkich kamer, zwłaszcza że kamera z rozdzielczością czasową 40 ms nie zapewnia możliwości obserwacji ekspansji aerozolu wodnego w czasie bezpośrednio po detonacji ładunku wybuchowego. Użycie szybkiej kamery pozwoli na weryfikację wyników jakie uzyskano za pośrednictwem standardowej kamery.

Detonacje rejestrowane były przez szybką kamerę, pracującą z częstotliwością 250 fps , oraz standardową kamerę (25 fps). Przy opracowywaniu wyników przyjęto dokładność odczytu czasu na poziomie $\Delta t = \pm 4 \text{ ms}$. Niepewność pomiarowa średnicy chmury związana jest z kilkoma elementami, które wyszczególnione zostały w Załączniku nr 2. Pomiar średnic chmur odbywał się przy wykorzystaniu programu Viana, a jego idea przedstawiona jest na Rysunku 6.2.1.



Rysunek 6.2.8. Szybka kamera FASTCAM – ultima 1024, używana do rejestracji rozprzestrzeniania się chmury aerozolu wodnego

W drugim etapie doświadczeń przetestowano różne rodzaje materiałów wybuchowych. Do produkcji aerozolu wodnego zastosowano: Emulinit (Emulsyjny MW Emulinit 2), Saletrol (ANFO) oraz Plastik (Plastyczny materiał wybuchowy MW MPW C-4). Parametry materiałów wybuchowych użytych w próbach przedstawione są w Tabeli 6.1.

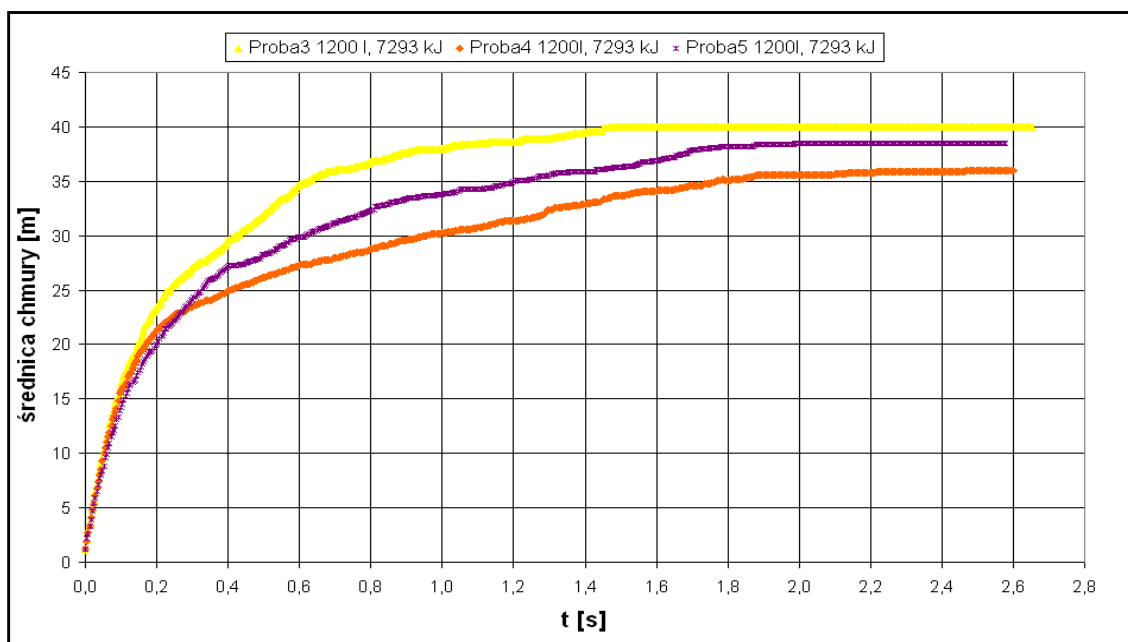
Ponadto przeanalizowany został wpływ alkoholu izobutyloвого na formowanie się chmury. Dodawano go w takiej ilości, aby zmniejszyć kilkukrotnie współczynnik napięcia powierzchniowego wody.

Wydajność gaszenia ognia aerozolem wodnym wytwarzanym metodą wybuchową związana jest z powierzchnią obszaru, jaki może zostać pokryty podczas jednego zrzutu. W celu otrzymania największej powierzchni (maksymalnej średnicy chmury), na podstawie szeregu prób, wypracowano sposób rozmieszczenia ładunku wybuchowego, który przedstawiony jest na Rysunku 6.3. Kapsuła wodna posiada kształt zbliżony do walca, w którego osi umieszczony jest główny ładunek. Na powierzchni wody (środką gaśniczego) umieszczony jest górny ładunek, którego zadaniem jest niedopuszczenie do rozprzestrzeniania się chmury w przeciwnym kierunku niż jest źródło ognia. Ładunek ten detonowany jest z opóźnieniem 2 ms w stosunku do głównego. Zastosowanie tego typu rozwiązania powoduje, iż rozprzestrzenianie się chmury jest zbliżone do tej, jaką uzyskuje się w konfiguracji cylindrycznej (rozdział 2, Rysunek 2.1).

Potwierdzeniem najlepszej wydajności, dla omawianego modelu kapsuły wodnej, są dane doświadczalne uzyskane z wielu prób - zarówno pierwszego jak i

6. ANALIZA WYNIKÓW

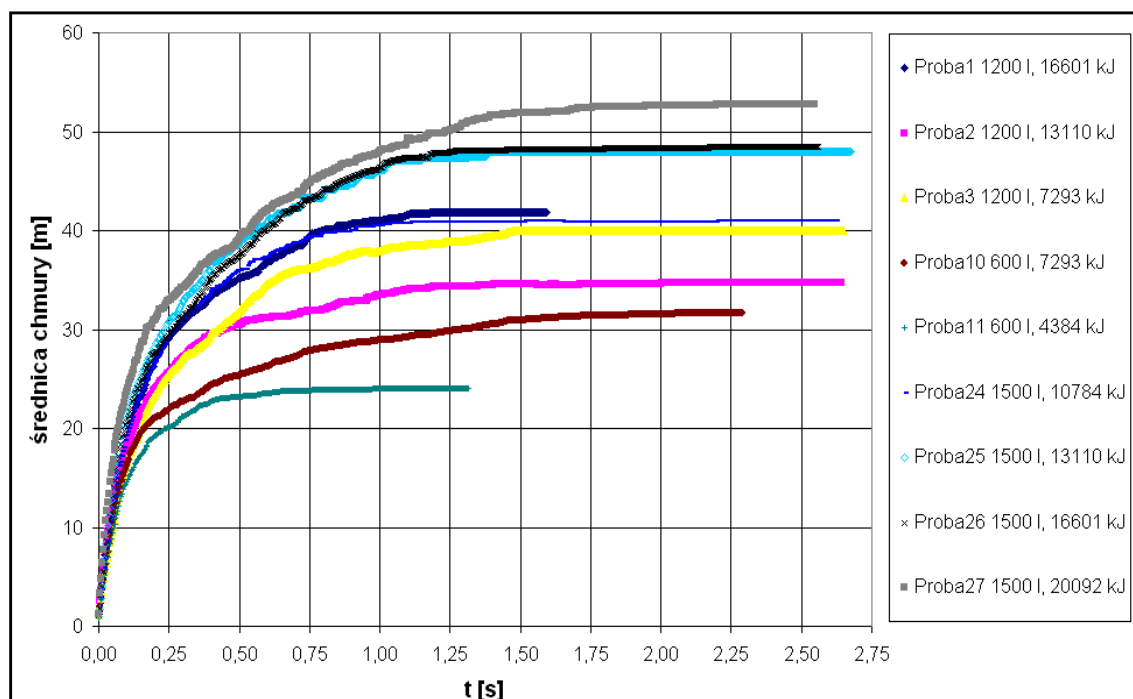
drugiego etapu doświadczeń. Przykładowy cykl doświadczalny, pozwalający na wyznaczenie najlepszego modelu kapsuły wodnej, przedstawiony jest na Rysunku 6.2.9. Wykres ten zawiera pomiary zasięgu dla worków o pojemności 1200 l, z ładunkiem 7,3 MJ Emulinitu. Poszczególne doświadczenia różniły się jedynie opóźnieniem w odpaleniu górnego ładunku wybuchowego względem dolnego. Linia żółta obrazuje średnicę chmury dla opóźnienia 2 ms, linia pomarańczowa – dla 20 ms, natomiast linia fioletowa nie ma górnego ładunku (opóźnienie 0 ms). Największy zasięg chmury uzyskano dla opóźnienia wynoszącego 2 ms – linia żółta wykresu. Wyniki te zostały potwierdzone w doświadczeniach, w których użyto worków o różnych pojemnościach, jaki i różnych wielkościach ładunków wybuchowych.



Rysunek 6.2.9. Średnica chmury w funkcji czasu dla kapsuł z wodą o masach 1200 kg. Ładunek wybuchowy: Emulinit. Energia wybuchu 7,3 MJ. Linia żółta – opóźnienie górnego ładunku 2 ms, linia fioletowa – opóźnienie górnego ładunku 0 ms, linia pomarańczowa – opóźnienie górnego ładunku 20 ms

Podczas drugiego etapu doświadczeń wykonane zostały łącznie 74 próby. Przykładowa grupa danych (zależności średnicy chmury od czasu rozprzestrzeniania) przedstawiona jest na Rysunku 6.2.10.

6. ANALIZA WYNIKÓW



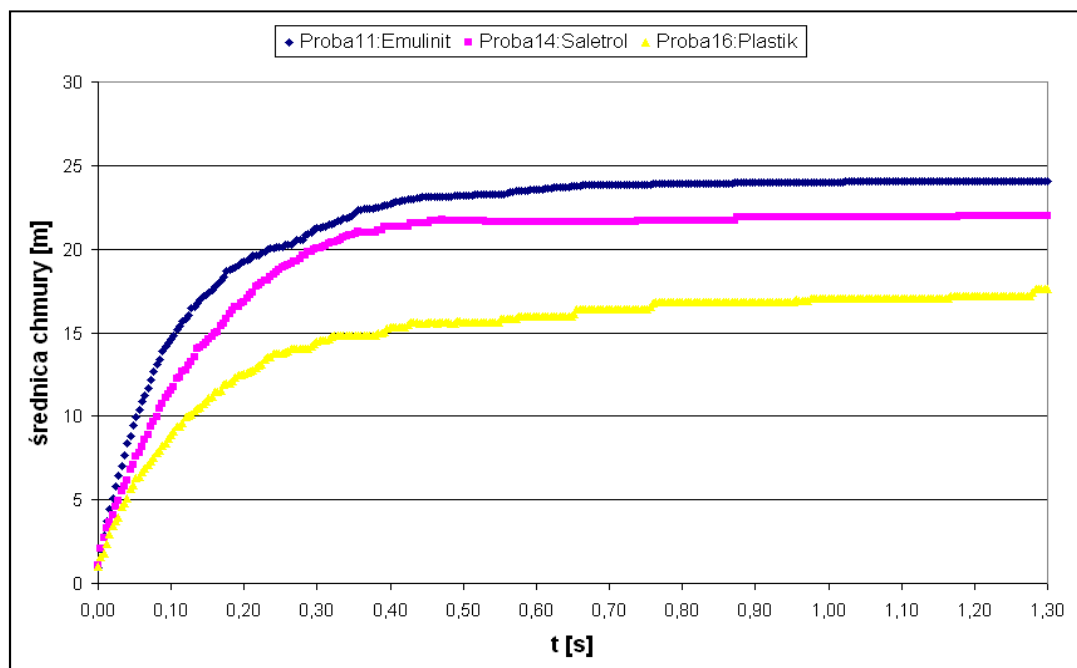
Rysunek 6.2.10. Średnica chmury w funkcji czasu dla kapsuł z wodą o masach 600 kg, 1200 kg i 1500 kg. Ładunek wybuchowy: Emulinit. Energia wybuchu od 4,4 MJ do 20,1 MJ

W celu porównania prób wykonywanych z różnymi rodzajami ładunków wybuchowych w kapsułach umieszczano ładunki o takich samych energiach wybuchu. Przeliczenia te zostały wykonane na podstawie parametru: idealna praca wybuchu, uzyskanego z danych katalogowych (Tabela 6.1). Dla przykładu wyznaczono, że 2500 g Emulinitu ma tę samą energię wybuchu co 1980 g Saletrolu i 1320 g Plastik.

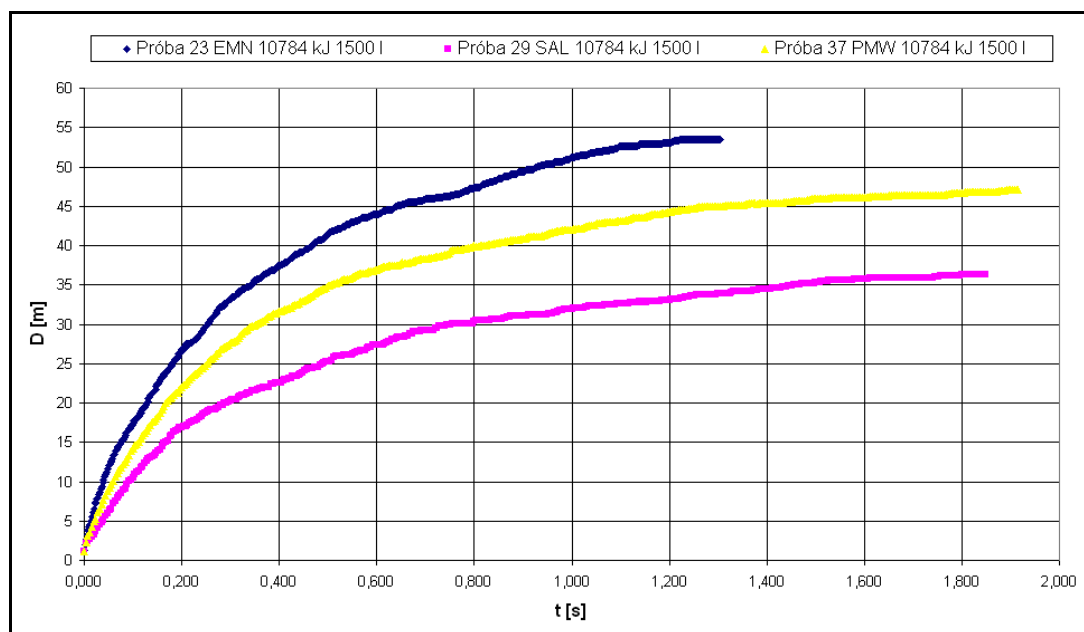
Zasadniczym parametrem, którym różnią się wyżej wymienione materiały wybuchowe, jest prędkość detonacji (Tabela 6.1). Wpływa ona na transfer energii do powierzchni wody i ma kluczowe znaczenie w odniesieniu do zasięgu chmury aerozolu wodnego.

Wykorzystanie w doświadczeniach trzech rodzajów materiałów wybuchowych pozwoliło na wybranie takiego z nich, który tworzyłby chmurę aerozolu wodnego o jak najkorzystniejszych parametrach z punktu widzenia gaszenia pożarów. Ustalono więc, że największy zasięg chmury występuje dla Emulinitu – jest on nawet o kilkadziesiąt procent większy od pozostałych. Na Rysunkach: 6.2.11 i 6.2.12 przedstawione są wyniki z dwóch cykli prób (porównywalne energie wybuchu), które potwierdzają ten wniosek.

6. ANALIZA WYNIKÓW



Rysunek 6.2.11. Średnica chmury w funkcji czasu dla trzech rodzajów materiałów wybuchowych (Emulinit, Saletrol, Plastik) dla kapsuły z wodą o masie 600 kg. Energia wybuchu: 4,4 MJ



Rysunek 6.2.12. Średnica chmury w funkcji czasu dla trzech rodzajów materiałów wybuchowych (Emulinit, Saletrol, Plastik) dla kapsuły z wodą o masie 1500 kg. Energia wybuchu: 10,8 MJ

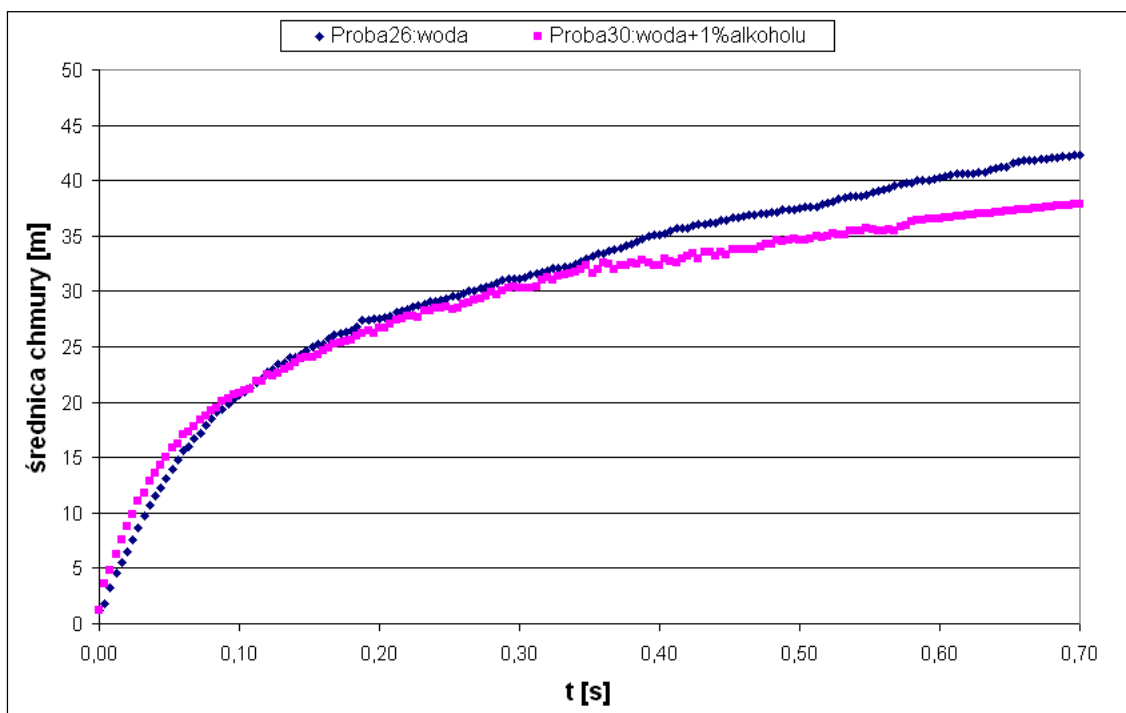
Rozważania teoretyczne dotyczące formownia się kropli aerozolu wodnego doprowadziły do wniosku, iż średnica kropli jest proporcjonalna do współczynnika napięcia powierzchniowego wody K – (wzór 3.17). Kilka serii prób wykonano więc w taki sposób aby możliwe było zaobserwowanie wpływu zmniejszenia współczynnika K . Ustalono, że w próbach gdzie jest on obniżony, występuje:

- większa średnica chmury aerozolu w początkowych chwilach ekspansji: dla czasu nie przekraczającego 100 ms (w odniesieniu do prób z wodą - Rysunek 6.2.13),
- mniejsza średnica chmury aerozolu w późniejszych chwilach ekspansji: dla czasu przekraczającego 100 ms (w odniesieniu do prób z wodą - Rysunek 6.2.13).

Pomimo wymienionych powyżej różnic, ogólna charakterystyka rozprzestrzeniania się chmury aerozolu, dla czasu nie przekraczającego 350 ms, jest bardzo podobna.

Na podstawie rozważań teoretycznych, zaprezentowanych w poprzednich rozdziałach, wynika, iż zmniejszenie o 28 % współczynnika napięcia powierzchniowego wody powoduje wytworzenie aerozolu o mniejszych średnicach o 28 % (wzór 3.17). Krople te są rozpędzane do mniejszych prędkości co ma znaczący wpływ na ostateczną średnicę chmury aerozolu. Z punktu widzenia zdolności gaśniczej aerozolu wodnego efekt ten ma dwojakie znaczenie. Z jednej strony krople o mniejszej średnicy mają znacznie lepszą zdolność gaśniczą, a z drugiej mniejsza średnica chmury aerozolu powoduje niższą wydajność każdego zrzutu (pokrycie mniejszego obszaru ognia). Bez wykonania szeregu doświadczeń polegających na gaszeniu ognia tego samego rodzaju, nie jest możliwe ustalenie w jaki sposób zmiana współczynnika napięcia powierzchniowego wpłynie na zdolność gaśniczą kapsuły.

6. ANALIZA WYNIKÓW

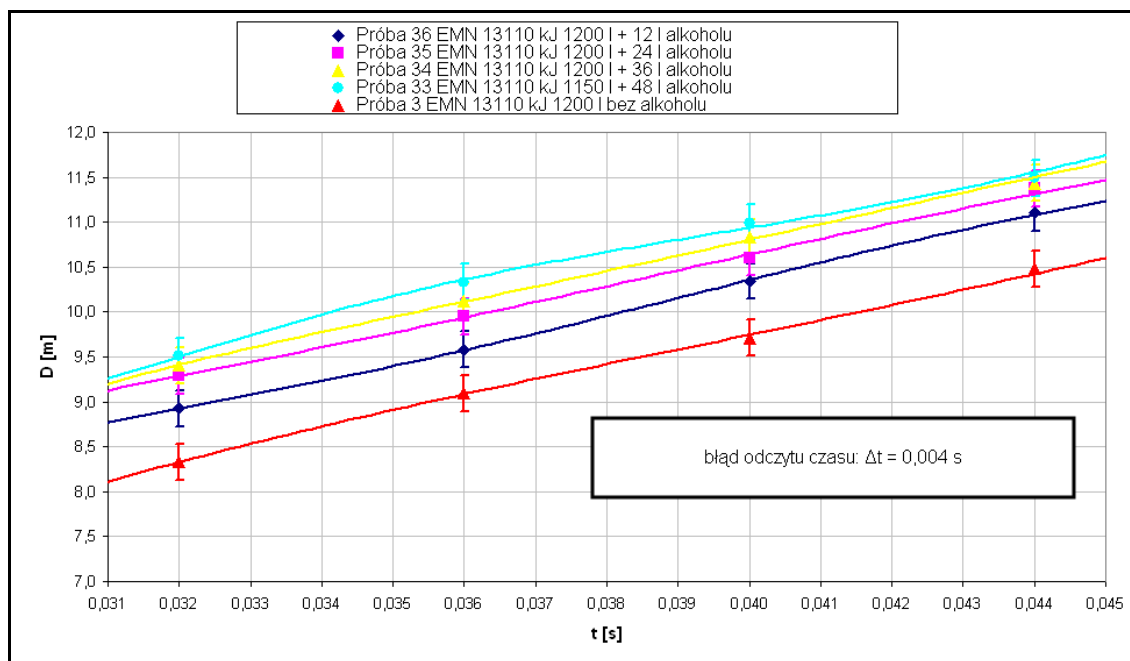


Rysunek 6.2.13. Średnica chmury w funkcji czasu dla: kapsuły o pojemności 1500 litrów z Emulinitem o energii 16,6 MJ. Linia niebieska: kapsuła z wodą; linia różowa: kapsuła z wodą i alkoholem izobutylovym. Współczynnik napięcia powierzchniowego dla próby opisanej linią niebieską wynosi $0,07349 \frac{J}{m^2}$, natomiast dla linii różowej to

$$0,053 \frac{J}{m^2}$$

Ilość dodanego alkoholu izobutylovego, dodawanego do wody w kapsułach wodnych, przekłada się na zmniejszenie współczynnika napięcia powierzchniowego. W celu zbadania jego wpływu na chmurę aerozolu wodnego wykonano serię prób, w których dodawano alkohol izobutylovym w ilości 12 l, 24 l, 36 l oraz 48 l. Wyniki tej grupy doświadczeń przedstawione są na Rysunku 6.2.14. Zaprezentowane tu krzywe potwierdzają tezę, mówiącą, iż im mniejszy współczynnik napięcia powierzchniowego wody zgromadzonej w kapsule, tym mniejsza średnica kropeł zostaje uzyskana w chwili detonacji ładunku wybuchowego. Ilość przeprowadzonych prób nie pozwala na wyciągnięcie głębszych wniosków ilościowych dotyczących tego zagadnienia, zwłaszcza, iż pomimo użycia szybkiej kamery (250 fps) błąd pomiarowy jest dosyć duży – Załącznik nr 2 (w odniesieniu do uzyskanych średnic chmur aerozolu).

6. ANALIZA WYNIKÓW



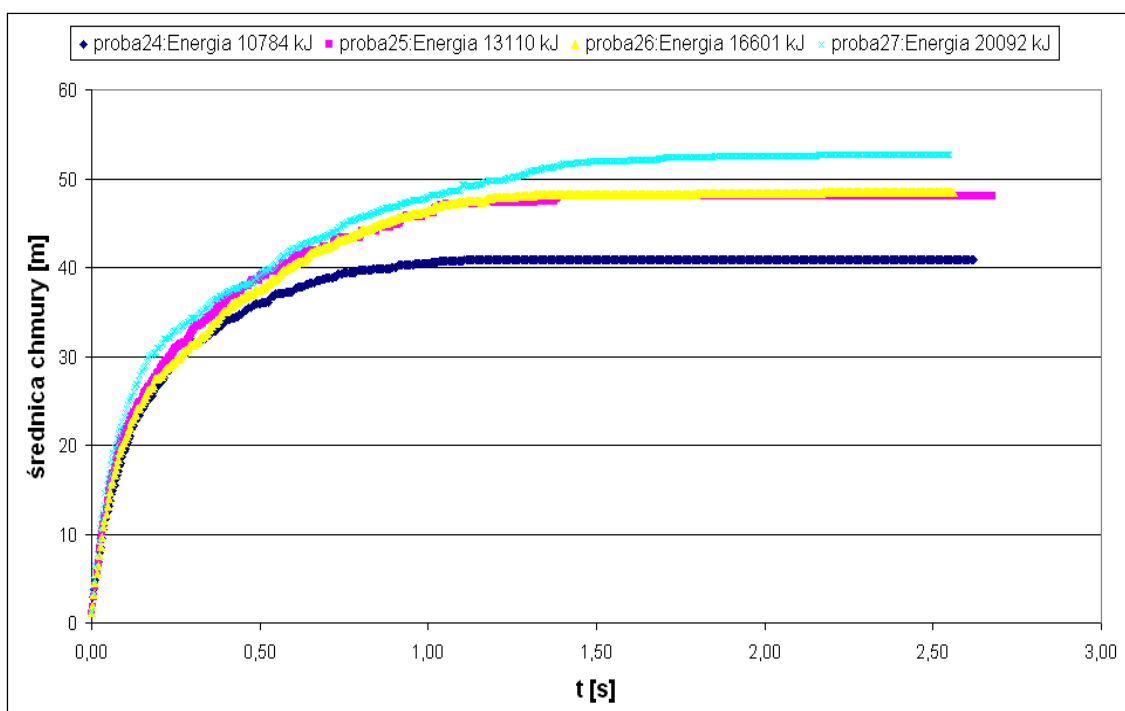
Rysunek 6.2.14. Zasięg chmury aerozolu wodnego dla prób z workami 1200 l z Emulinitem (energia wybuchu 13310 kJ) z o obniżonym współczynnikiem napięcia powierzchniowego. Linia seledynowa – dodatek 12 l alkoholu izobutyłowego, linia żółta – dodatek 24 l alkoholu izobutyłowego, linia różowa – dodatek 36 l alkoholu izobutyłowego, linia granatowa – dodatek 48 l alkoholu izobutyłowego, linia czerwona – bez alkoholu. Wykresy sugerują, iż im mniejszy współczynnik napięcia powierzchniowego, tym mniejszy promień kropeł aerozolu wodnego uzyskany w chwili detonacji ładunku wybuchowego

Drugi etap prób potwierdził wnioski wyciągnięte w pierwszym etapie, dotyczące zjawiska spadku wydajności energii wybuchu w odniesieniu do maksymalnej średnicy chmury aerozolu. Tzw. zjawisko „przedmuchiania” zostało zaobserwowane dla różnych konfiguracji: masa kapsuły – energia wybuchu. Na Rysunku 6.2.15 przedstawiony jest ten efekt (ładunek wybuchowy: Emulinit, worki: 1500 litrów, ładunek gaśniczy: woda) - dla energii 13,1 MJ obserwuje się jedynie o 4 m mniejszą średnicę chmury od próby, w której wykorzystano ładunek 20,1 MJ. W omawianym zjawisku należy zwrócić uwagę również na powierzchnię obszaru, który zostanie pokryty aerozolem, jak również na gęstość pokrycia płonącej powierzchni aerozolem – zbyt mała nie powoduje wymaganego efektu gaśniczego. Ostatni wyszczególniony parametr ściśle uzależniony jest od rodzaju ognia, a co za tym idzie nie może być wyznaczony jednoznacznie.

6. ANALIZA WYNIKÓW

Jedynie próby polegające na gaszeniu rzeczywistego ognia pozwolą na jego oszacowanie. Dla omawianej powyżej serii doświadczeń uzyskano:

- zwiększenie energii wybuchu o około 54 % (z 13,1 MJ do 20,1 MJ),
- zwiększenie średnicy chmury o około 6 % (z 48 m do 52,5 m),
- zwiększenie powierzchni obszaru pokrytego aerozolem wodnym o około 20 % (z 1809 m² do 2164 m²).



Rysunek 6.2.15. Średnica chmury w funkcji czasu dla kapsuł o masie 1500 kg. Ładunek wybuchowy: Emulinit. Energia wybuchu: 10,8 MJ – linia ciemnoniebieska, 13,1 MJ – linia różowa, 16,6 MJ – linia żółta, 20,1 MJ – linia jasnoniebieska

W Tabeli 6.2.1 przedstawione jest zestawienie maksymalnych zasięgów chmur uzyskanych dla różnych energii wybuchu dla trzech rodzajów worków (600 dm³, 1200 dm³, 1500 dm³) i dla trzech rodzajów materiałów wybuchowych (Emulinit, Saletrol, Plastik (Tabela 6.1)). Kolorowymi polami zaznaczone są tu średnice chmur, dla których uwidocznił się efekt „przedmuchiania”. Jako przykład można tu podać, iż dla worków o masie 1200 kg z Saletrolem i Plastikami i energii wybuchu 16,6 MJ uzyskano o około 5 m mniejszą maksymalną średnicę chmury niż dla energii 13,1 MJ. Dla kapsuł

6. ANALIZA WYNIKÓW

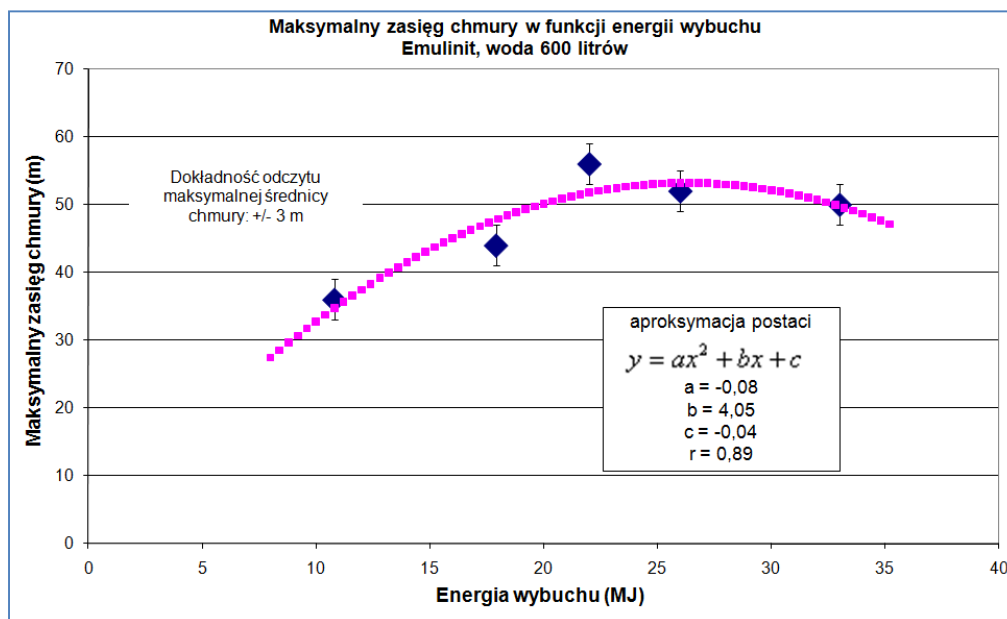
o masie 1500 kg efekt spadku zasięgu chmury wraz ze wzrostem energii wybuchu uzyskano jedynie dla Plastik.

Tabela 6.2.1. Maksymalny zasięg chmury uzyskany dla różnych energii wybuchu dla trzech rodzajów worków (opis w tekście). Na kolorowych polach zaznaczone są zasięgi chmur, dla których uwidoczniiony jest efekt „przedmuchania”

Ilość wody (dm ³)	Energia wybuchu (MJ)	Emulinit	Saletrol	Plastik
		Maksymalny zasięg chmury (m)		
600	4,4	24,0	22,0	17,5
600	7,3	31,5	22,5	22,0
1200	7,3	36,0	30,0	29,0
1200	13,1	35,0	39,5	40,0
1200	16,6	42,0	34,5	36,5
1500	10,8	41,0	41,5	48,0
1500	16,6	48,5	49,0	44,0

W doświadczeniach z wykorzystaniem najmniejszych worków (masa wody 600 kg), w drugim etapie doświadczeń, nie został zaobserwowany „efekt przedmuchania” (Tabela 6.2.1). Spowodowane jest to tym, że w „pierwszym etapie doświadczeń” (opisanym w poprzednim podrozdziale) zgromadzono już dane na ten temat i, wyciągając odpowiednie wnioski, stosowane były takie wielkości ładunków wybuchowych, które pozwoliły na uzupełnienie zgromadzonych wcześniej danych. Wyniki z pierwszego etapu doświadczeń (ładunek wybuchowy Emulinit, masa wody 600 kg) zaprezentowane są na Rysunku 6.2.16. Uwidacznia się tu zjawisko „przedmuchania” dopiero dla największych wykorzystywanych energii wybuchu. Przedstawiona na Rysunku 6.2.16 aproksymacja danych doświadczalnych do funkcji kwadratowej jest jedną z wielu możliwości i ma na celu obrazowe ukazanie gwałtowności procesu spadku wydajności energii w odniesieniu do maksymalnej średnicy chmury.

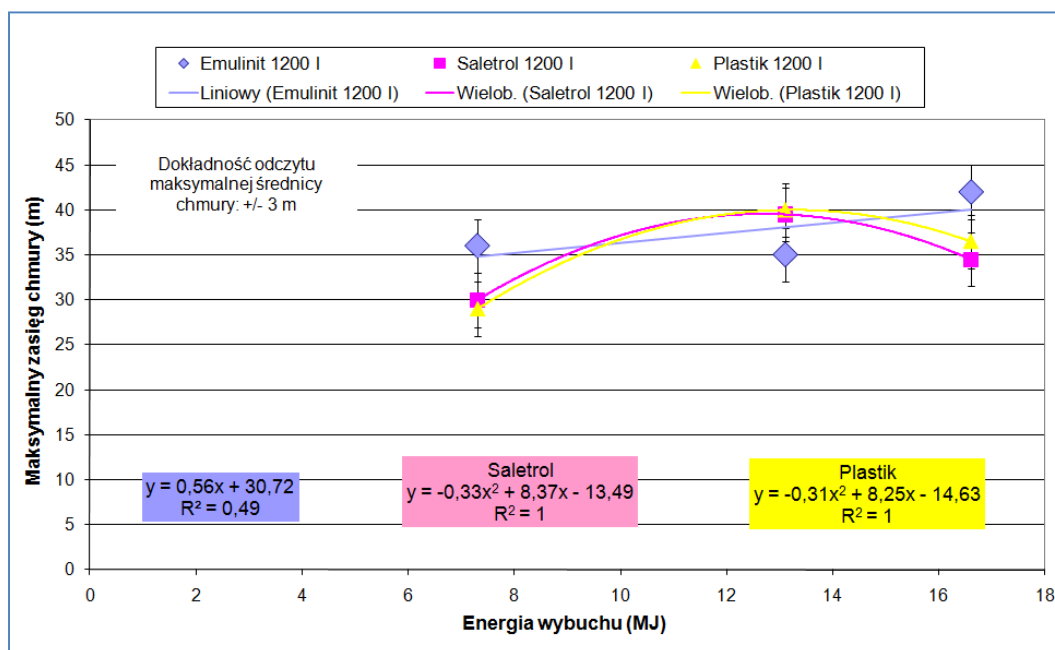
6. ANALIZA WYNIKÓW



Rysunek 6.2.16. Maksymalny zasięg chmury w funkcji energii wybuchu dla kapsułów o masie 600 kg. Ładunek wybuchowy: Emulinit. Dla energii 27 i 33 MJ, uwidoczniony jest efekt „przedmuchiania”. Aproksymacja danych doświadczalnych do krzywej postaci $y = ax^2 + bx + c$ (metoda najmniejszych kwadratów). Wartości współczynników a , b , c podane na rysunku. Krzywa aproksymująca została naniesiona w celu zobrazowania zjawiska „przedmuchiania” i nie służy do wyciągania wniosków ilościowych

Na Rysunku 6.2.17 uwidoczniony jest zjawisko „przedmuchiania” dla worków z wodą o masie 1200 kg (rodzaj ładunku: Emulinit, Saletrol, Plastik; energia ładunku: 7,3 MJ, 13,1 MJ, 16,6 MJ). Wykres ten uwidacznia bardzo zbliżone rezultaty dla Saletrolu i Plastik. Można tu zaobserwować, że dla prób z ładunkiem 13,1 MJ i 16,6 MJ przy zwiększeniu wielkości ładunku wybuchowego o około 27 % nastąpił spadek maksymalnej średnicy chmury o około 12 %. Przekłada się to na zmniejszenie o około 23 % powierzchni obszaru, który został pokryty aerozolem wodnym. Na Rysunku 6.2.17 przedstawione są równania funkcji aproksymujących punkty doświadczalne: dla Saletrolu i Plastik dopasowano krzywe będące wielomianami drugiego stopnia, a dla Emulinitu dopasowano funkcję liniową (aproksymacja metodą najmniejszych kwadratów). Krzywe te zostały naniesione w celu zobrazowania zjawiska „przedmuchiania” i nie służą do wyciągania wniosków ilościowych.

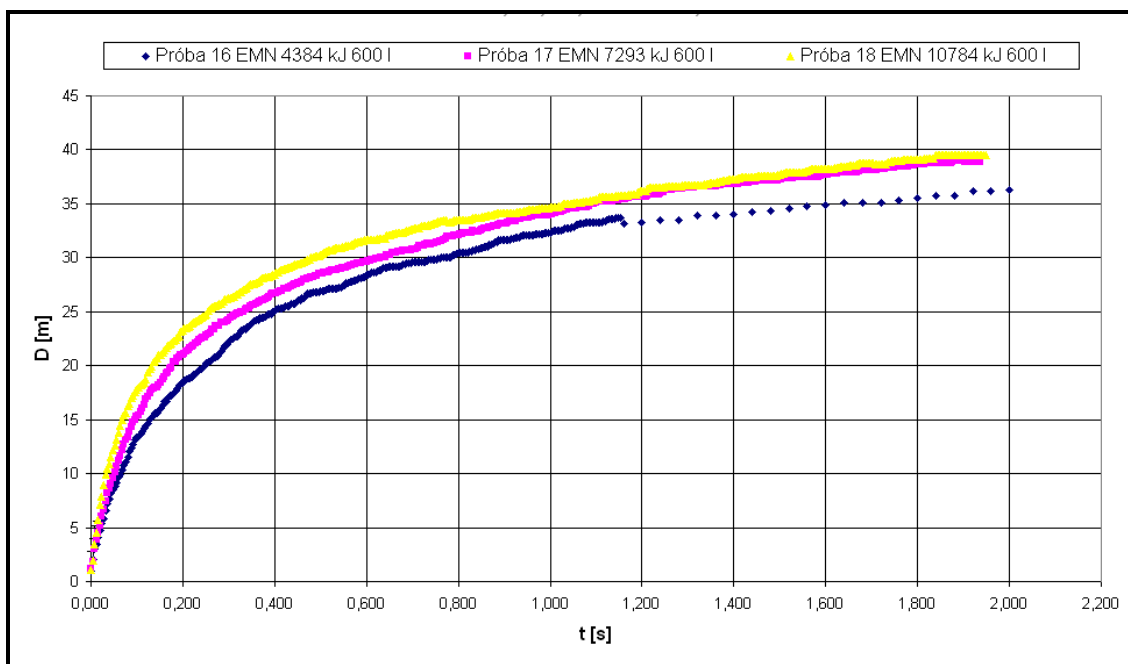
6. ANALIZA WYNIKÓW



Rysunek 6.2.17. Maksymalny zasięg chmury w funkcji energii wybuchu dla kapsuł o masie 1200 kg. Ładunek wybuchowy: Emulinit (punkty niebieskie), Saletrol (punkty różowe), Plastik (punkty żółte). Dla Plastik i Saletrolu, dla energii 16,6 MJ, uwidocznił się efekt „przedmuchiania”. Na wykresie przedstawione są aproksymujące funkcje w celu zobrazowania zjawiska „przedmuchiania” i nie służy do wyciągania wniosków ilościowych

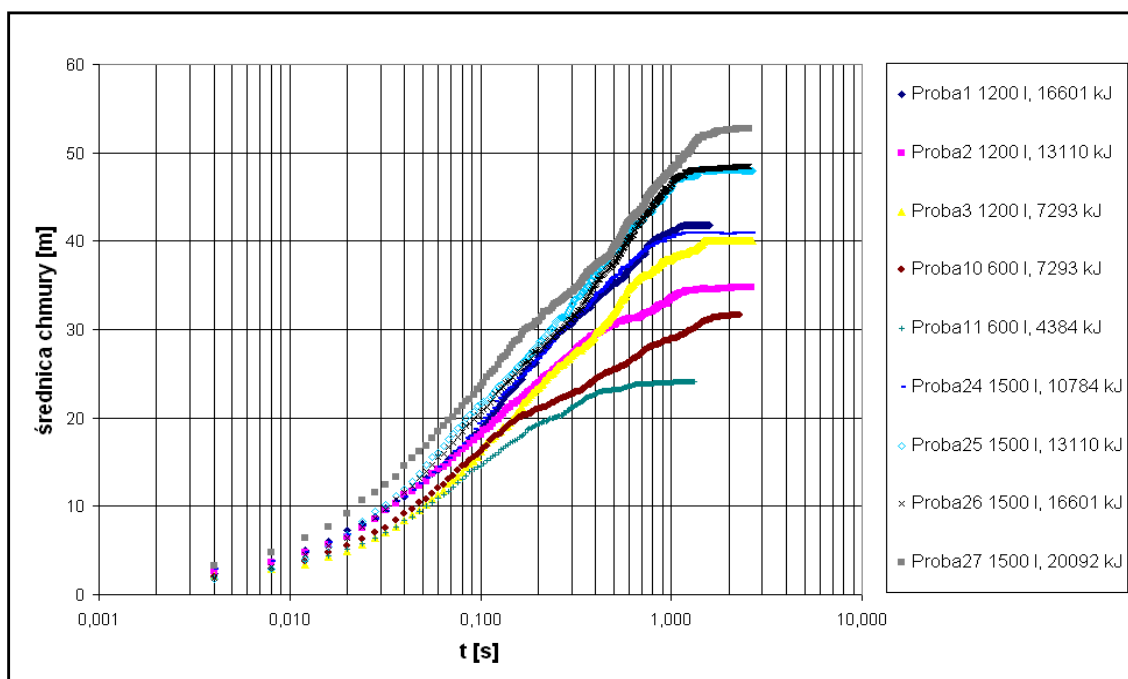
Podczas wielu prób z użyciem takich samych kapsuł wodnych (oraz tej samej ilości wody zgromadzonej wewnątrz) różniących się energią wybuchu ładunków w nich zgromadzonych, zauważono, że również występuje tu tzw. zjawisko „przedmuchiania”, lecz w nieco innym kontekście. Przykładem może być seria danych z Rysunku 6.2.18, na której widać, iż pomimo zwiększania ilości ładunku wybuchowego w kapsułach nie uzyskano tu zwiększenia średnicy chmury aerozolu wodnego (w granicy błędu pomiarowego – Załącznik nr 2). Prezentowane tu zjawisko może być początkowym etapem „przedmuchiania”.

6. ANALIZA WYNIKÓW



Rysunek 6.2.18. Zwiększanie ilości ładunku wybuchowego w kapsule wodnej nie przekłada się na zwiększenie maksymalnej średnicy chmury aerozolu wodnego, co można interpretować, jako początki zjawiska „przedmuchania”

Wykresy zależności średnicy chmury aerozolu wodnego w funkcji czasu przedstawionego na skali logarytmicznej, dla drugiego etapu doświadczeń, pozwalają na ostateczną weryfikację hipotez postawionych w podrozdziale dotyczącym rozważań teoretycznych. Na podstawie zgromadzonych danych (np. Rysunek 6.2.19) wypracowana została ogólna charakterystyka rozprzestrzeniania się aerozolu, która przedstawiona jest na Rysunku 6.2.21. Opis ten powstał na podstawie analizy wyników z poszczególnych prób – przykładowy wykres przedstawiony jest na Rysunku 6.2.20.



Rysunek 6.2.19. Średnica chmury w funkcji czasu przedstawionym na skali logarytmicznej dla kapsuł z wodą o masach 600 kg, 1200 kg i 1500 kg. Ładunek wybuchowy: Emulinit. Energia wybuchu od 4,4 MJ do 20,1 MJ

Zależność średnicy aerozolu wodnego od czasu w skali logarytmicznej wykazuje taki sam kształt jaki otrzymaliśmy z rozważań teoretycznych i kształt ten jest dobrze określony w każdym z trzech przedziałów (obszarów):

- 1) „obszar nieliniowy”,
- 2) „obszar Bernoulliego”,
- 3) „obszar Stokesa”.

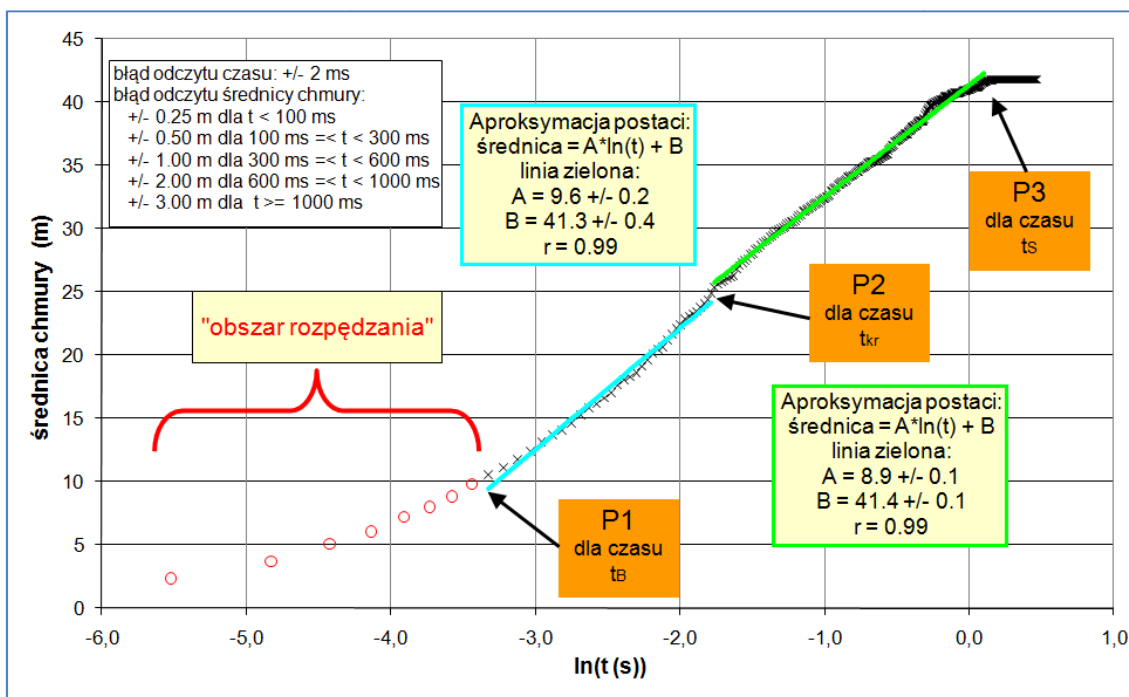
„Obszar nieliniowy” przypada na pierwsze chwile ekspansji chmury. Odpowiada to czasom od 16 ms do 40 ms oraz średnicom aerozolu od około 6 m do 10 m, a więc około 20% maksymalnej średnicy chmury. Punkty, z tego obszaru (np. Rysunek 6.2.20), nie układają się wzdłuż funkcji liniowej. Obszar ten nie został przewidziany analitycznie. W pierwszym etapie doświadczeń nie mógł być on zaobserwowany ze względu na użycie kamery pracującej ze zbyt małą częstotliwością – 25 fps, z czym związany był błąd pomiarowy: +/- 20 ms.

Kolejnym obszarem, obserwowanym w procesie rozprzestrzeniania się chmury, jest „obszar Bernoulliego” (Rysunek 6.2.20). Etap ten jest kluczowy, z punktu widzenia

gaszenia ognia aerozolem wodnym, albowiem następuje tu największa ekspansja – około 75 % maksymalnej średnicy chmury. Rozważania teoretyczne, na temat rozprzestrzeniania się aerozolu, wskazują, iż w obszarze tym dominują opory, które są wprost proporcjonalne do kwadratu prędkości kropeł (rozdział 4 i 5). Dane doświadczalne potwierdzają istnienie tego obszaru. Wykres, w tym obszarze, jest funkcją podwójnie liniową co również zostało przewidziane analitycznie – ma tu miejsce zjawisko zmiany współczynnika oporu aerodynamicznego z wartości $c \approx 0,2$ do $c \approx 0,4$ (obszar nadkrytyczny i podkrytyczny). Punkt załamania (P2) jest mało widoczny na większości prób. Przypada on na pierwsze 100 do 400 ms ekspansji aerozolu.

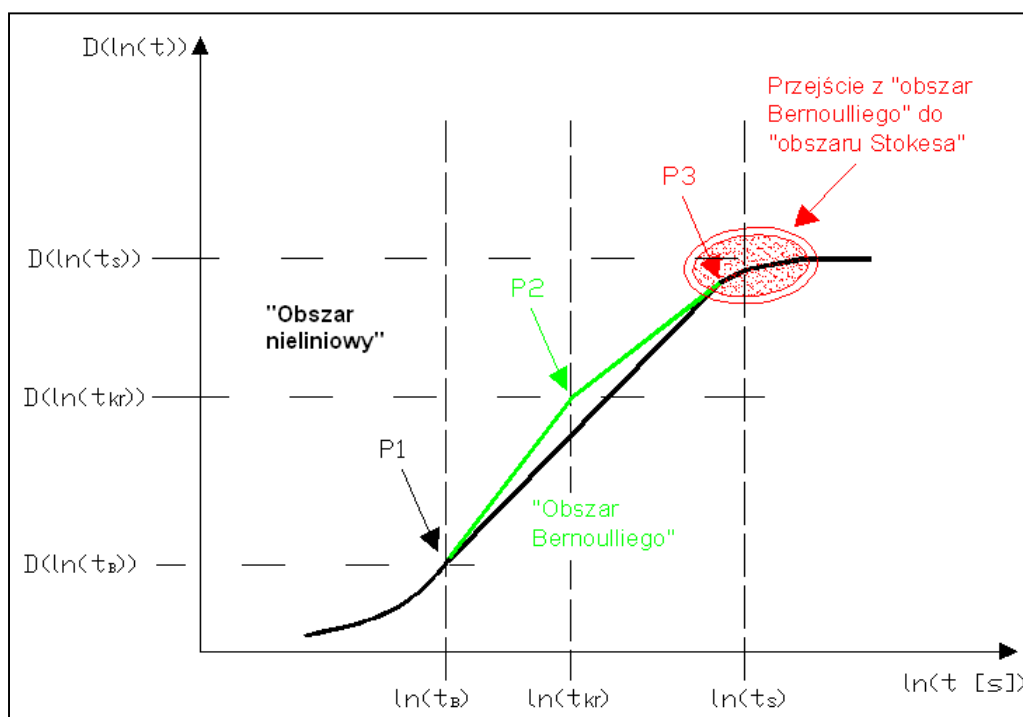
Ostatnim obszarem, wyszczególnionym w procesie rozszerzania się aerozolu wodnego, jest „obszar Stokesa” (Rysunek 6.2.20). W etapie tym krople mają relatywnie małe prędkości, w odniesieniu do „obszaru Bernoulliego”, a w związku z tym ekspansja chmury jest niewielka – około 5 % maksymalnej średnicy. Występowanie tego obszaru świadczy, iż siła oporu działająca na krople jest wprost proporcjonalna do ich prędkości (rozdział 4). Przejście chmury w „obszar Stokesa” może być w praktyce utożsamiane z zakończeniem procesu ekspansji chmury (około 1,5 ÷ 2,0 s od chwili detonacji głównego ładunku wybuchowego). Z punktu widzenia gaszenia pożarów, ostatnia faza rozprzestrzeniania, nie ma właściwie żadnego znaczenia.

6. ANALIZA WYNIKÓW



Rysunek 6.2.20. Zależność średnicy chmury aerozolu wodnego od czasu rozprzestrzeniania przedstawionej na skali logarytmicznej. Ładunek wybuchowy: Emulinit o energii wybuchu 16,6 MJ. Kapsuła z wodą o masie 1200 kg. P1 – punkt, w którym następuje przejście z „obszaru nieliniowego” do „obszaru Bernoulliego”, P2 – punkt w obszarze Bernoulliego, w którym następuje „kryzys oporu” związany z gwałtowną zmianą współczynnika oporu aerodynamicznego kropli, P3 – punkt, w którym kończy się „obszar Bernoulliego” i zaczyna „obszar Stokesa”

Na Rysunku 6.2.20 przedstawione są graficznie dane z jednej z prób: kapsuła o masie 1200 kg z wodą, ładunek wybuchowy Emulinit, energia wybuchu 16,6 MJ. Można tu zaobserwować wszystkie z obszarów przewidzianych analitycznie: „obszar nieliniowy”, „obszar Bernoulliego” wraz z występującymi w nim obszarami nadkrytycznym i podkrytycznym oraz „obszar Stokesa”. Punkt P1 jest dla czasu $t_B \approx 32$ ms i średnicy chmury $D \approx 10$ m. Punktowi P2 odpowiada czas $t_{kr} \approx 200$ ms i średnica chmury $D \approx 25$ m. Punkt P3 występuje dla czasu $t_S \approx 1100$ ms i średnicy chmury $D \approx 42$ m.



Rysunek 6.2.21. Wykres zależności średnicy aerolu wodnego od czasu przedstawionej na skali logarymicznej – opis w tekście. P1 – punkt, w którym następuje przejście z „obszaru nieliniowego” do „obszaru Bernoulliego”, P2 – punkt w obszarze Bernoulliego, w którym następuje „kryzys oporu” związany z gwałtowną zmianą współczynnika oporu aerodynamicznego kropli, P3 – punkt, w którym kończy się „obszar Bernoulliego” i zaczyna „obszar Stokesa”

Wykres na Rysunku 6.2.21 jest weryfikacją rozważań teoretycznych nad zjawiskiem rozprzestrzeniania się chmury aerolu wodnego, które przedstawione są na Rysunku 5.2. Przeprowadzenie prób przy użyciu „szybkiej kamery” w drugim etapie badań doświadczalnych pokazało słusność wniosków płynących z pierwszego etapu doświadczeń i potwierdziło model teoretyczny:

- wyznaczono kształt i zakres „obszaru nieliniowego”,
- zweryfikowana została hipoteza przejścia kropli aerolu wodnego przez obszar obejmujący krytyczną liczbę Reynoldsa („kryzysu oporu” dla $Re \approx 3 \cdot 10^5$) – dla dużych energii wybuchu, w stosunku do masy wody zgromadzonej w kapsule, krople nie uzyskują prędkości, które obejmowałyby liczbę krytyczną Re ,
- zaobserwowano występowanie zasadniczej ekspansji chmury w „obszarze Bernoulliego”,

6. ANALIZA WYNIKÓW

- zaobserwowano, iż przejście chmury w „obszar Stokesa” może być w praktyce utożsamiane z zakończeniem procesu ekspansji chmury: $D_S \approx D_{MAX}$, a w związku z tym równanie (5.20) jest funkcją silnie malejącą.

Tabela 6.2.2. Zestawienie czasów (t_B) i odpowiadającym im średnic chmury ($D(t_B)$) dla których następuje koniec „obszaru nieliniowego” i początek „obszaru Bernoulliego”; obszary te zaznaczone są na Rysunku 6.2.20

Opis	Energia wybuchu	t_B	$D(t_B)$
600 l woda	4384 kJ	32 ms	7,03 m
600 l woda	7293 kJ	28 ms	6,97 m
1200 l woda	7293 kJ	36 ms	7,64 m
1200 l woda	7293 kJ	36 ms	7,43 m
1200 l woda	7293 kJ	40 ms	7,68 m
1200 l woda	13110 kJ	20 ms	6,52 m
1200 l woda	16601 kJ	32 ms	9,81 m
1500 l woda	10784 kJ	24 ms	7,84 m
1500 l woda	13110 kJ	24 ms	8,34 m
1500 l woda	16601 kJ	20 ms	6,44 m
1500 l woda	20092 kJ	24 ms	10,62 m
600 l woda + alkohol	4384 kJ	28 ms	5,86 m
600 l woda + alkohol	7293 kJ	28 ms	6,51 m
1200 l woda + alkohol	7293 kJ	40 ms	7,04 m
1200 l woda + alkohol	13110 kJ	20 ms	6,34 m
1200 l woda + alkohol	16601 kJ	24 ms	8,31 m
1500 l woda + alkohol	13110 kJ	20 ms	8,27 m
1500 l woda + alkohol	16601 kJ	16 ms	7,59 m

Obszar odpowiedzialny za nadanie kroplom aerozolu wodnego prędkości początkowej - „obszar nieliniowy”, jest najmniej zbadany z całego etapu ekspansji chmury. Obserwuje się tu największą dynamikę całego procesu, która przypada na kilka początkowych klatek filmów rejestrujących rozprzestrzenianie się chmury. W Tabeli 6.2.2 zebrane zostały wyniki w postaci czasu (t_B) oraz średnicy chmury ($D(t_B)$), które obserwuje się na końcu etapu „nieliniowego”. Dane te mogą stać się przyczynkiem do prowadzenia dalszych badań nad zachodzącymi zjawiskami wytwarzania aerozolu wodnego w pierwszych chwilach po eksplozji materiału wybuchowego. Analiza wyników z Tabeli 6.2.2 skłania do następującego wniosku: im mniejsza energia wybuchu, tym dłuższy czas rozpędzania chmury oraz im większa energia wybuchu, tym krótszy czas rozpędzania chmury.

W rozdziale 5 postawiona została hipoteza wyjaśniająca występowanie punktu P2 w „obszarze Bernoulliego”. Wyjaśnienie teoretyczne występowania załamania wykresu $D(\ln(t))$ opierało się na tym, iż przy odpowiedniej prędkości kropli (liczbie Reynoldsa) następuje gwałtowna zmiana współczynnika oporu aerodynamicznego. W tej części rozdziału zostaną przedstawione wnioski z prób doświadczalnych, które pozwolą na postawienie nowej hipotezy dotyczącej omawianej kwestii.

Na podstawie wzorów (3.18) i (5.13) można otrzymać równanie pozwalające na oszacowanie prędkości kropel aerozolu wodnego przy przejściu przez krytyczną liczbę Re:

$$v(p) = \frac{Re \cdot v \cdot E_{cexp}}{2 \cdot K \cdot S_0 \cdot R} \cdot \frac{p}{100} \quad (6.3.1)$$

gdzie

p – współczynnik określający jaka część całkowitej energii eksplozji została zużyta na fragmentację (-) ($p \in (0,100)$),

v – lepkości kinematycznej płynu opływającego ciało (powietrza) (m^2/s),

K – współczynnik napięcia powierzchniowego na granicy faz woda-powietrze (J/m^2),

R – promień kapsuły (m),

S_0 – powierzchnia kapsuły (m^2),

E_{cexp} – całkowita energia eksplozji ładunku wybuchowego umieszczonego w kapsule wodnej (J).

Na podstawie wzorów (3.18) i (6.3.1) dokonano oszacowania promienia kropel aerozolu wodnego oraz ich prędkości przy przejściu chmury przez krytyczną liczbę Re (gwałtowna zmiana współczynnika oporu aerodynamicznego kropli). Otrzymane rezultaty (dla jednej z prób) przedstawione są w Tabeli 6.2.3. Dane doświadczalne wskazują, iż prędkość chmury aerozolu jest mniejsza od prędkości dźwięku, co przekłada się również na każdą kroplę tworzącą chmurę wodną (prędkości rozprzestrzeniania się chmury oraz pojedynczych kropel są zbliżone). W Tabeli 6.2.3 poddźwiękowym zakresie prędkości odpowiadają kilkucentymetrowe promienie

kropel. Jest to dowód na to, iż występowanie punktu P2 nie jest związane z „kryzysem oporu”.

Tabela 6.2.3. Oszacowanie wielkości kropeł aerozolu wodnego oraz prędkości w miejscu gwałtownej zmiany współczynnika oporu aerodynamicznego kropeł („kryzys oporu”, Rysunek 5.1) w funkcji udziału całkowitej energii eksplozji p , która została zużyta na fragmentację

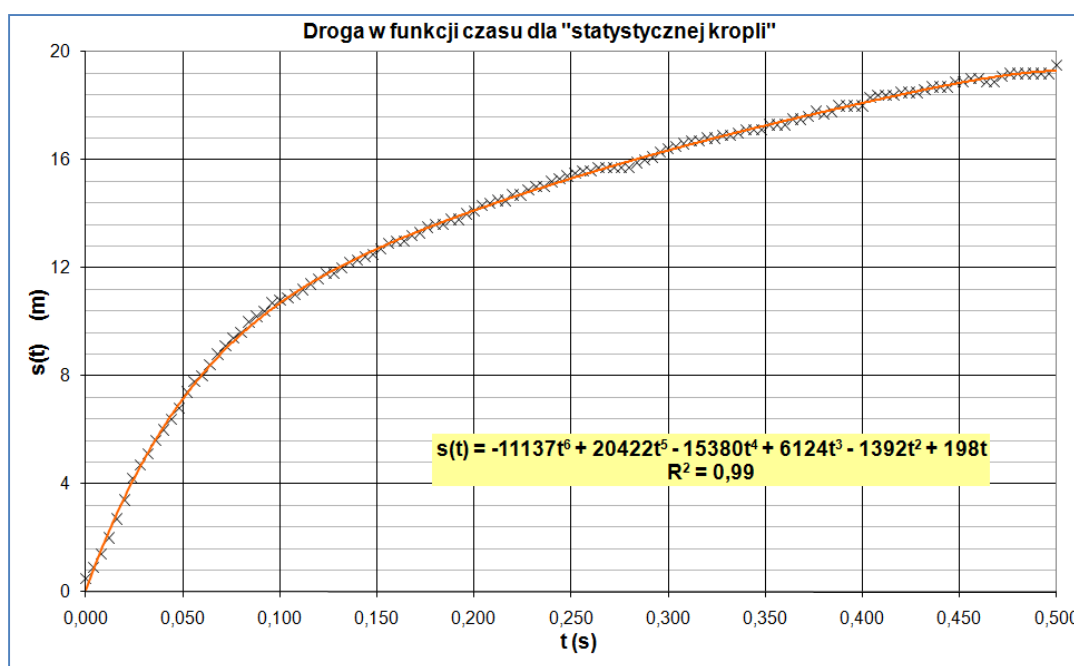
p (%)	$v(p)$ (m/s)	r_{kmin} (m)
0,001	1,1E+02	2,5E-02
0,005	5,5E+02	5,1E-03
0,01	1,1E+03	2,5E-03
0,05	5,5E+03	5,1E-04
0,1	1,1E+04	2,5E-04
0,5	5,5E+04	5,1E-05
1	1,1E+05	2,5E-05
5	5,5E+05	5,1E-06
10	1,1E+06	2,5E-06

Oszacowanie prędkości kropeł aerozolu wodnego można wykonać na podstawie średnicy chmury w funkcji czasu rozprzestrzeniania. Zakładając, iż funkcja określająca połowę średnicy chmury odpowiada drodze jaką pokonuje pojedyncza kropla aerozolu $s(t) = 0,5 \cdot D(t)$. Tego typu podejście pozwala na analizę rozprzestrzeniania się „statystycznej” kropli i na poziomie celów tej pracy można uznać je za dopuszczalne. Na Rysunku 6.2.22 przedstawiony jest przykładowy wykres ukazujący przemieszczanie się kropli aerozolu wodnego w funkcji czasu.

Ponieważ chwilowa prędkość kropli aerozolu jest pochodną funkcji położenia w danym punkcie, dokonano aproksymacji wykresu $s(t)$ wielomianem szóstego stopnia (wybór funkcji aproksymującej uzależniony był od wartości współczynnika dopasowania R^2). Na podstawie uzyskanego równania uzyskane zostały wykresy prędkości chwilowych, które przedstawione są na Rysunkach 6.2.23 i 6.2.24. Wybór stopnia wielomianu do aproksymacji danych doświadczalnych podyktowany jest wartością otrzymanego współczynnika determinacji R^2 . Jego wartość dla wszystkich otrzymanych wyników to około 0,999 (z procedurą tą autor pracy spotkał się w pracy [67]). Wartość ta świadczy o doskonałej zgodności danych doświadczalnych z funkcją aproksymującą. Zasadniczym celem aproksymacji danych pomiarowych było "wygładzanie danych". Podczas obróbki filmów z prób doświadczalnych należy wskazywać ręcznie położenie punktów, a wiąże się to z błędami wskazań. Błędy te są przypadkowe i zgodnie z teorią

6. ANALIZA WYNIKÓW

błędów można domniemywać, że mogą mieć rozkład zbliżony do rozkładu normalnego, w każdym bądź razie na pewno wyniki wskazań oscylują wokół wartości właściwej, raz są powyżej niej, a raz poniżej. W związku z tym właściwe wartości prawdopodobnie leżą pomiędzy wskazaniem obserwatora. Aproksymacja danych doświadczalnych metodą najmniejszych kwadratów wykonuje "uśrednienie" danych, znajduje najoptymalniejszą krzywą leżącą pomiędzy punktami pomiarowymi. Uniezależnia ona wynik pomiaru od błędów przypadkowych. W tym sensie należy rozumieć wspomniane wyżej określenie "wygładzania danych". Ponadto należy tu dodać, że aproksymacja danych odpowiedniego stopnia wielomianem nie ma tu na celu stworzenia czy sprawdzenia teorii fizycznej uzyskanej na podstawie tych równań. Można powiedzieć, iż równania te służą jedynie do pozbycia się błędów przypadkowych, a co za tym idzie uzyskania bardziej rzetelnych danych.



Rysunek 6.2.22. Oszacowanie drogi kropli aerozoli wodnego w funkcji czasu rozprzestrzeniania się chmury. Dla danych doświadczalnych dopasowano funkcję aproksymującą – wielomian stopnia szóstego – stopień wielomianu wybrany ze względu na wysoką wartość współczynnika determinacji $R^2=0,9995$ (równanie przedstawione jest na rysunku). Równanie aproksymujące może posłużyć do oszacowania prędkości chwilowych kropeł aerozolu wodnego. Wykres przedstawia dane doświadczalne dla jednej z prób poligonowych (próba 25): pojemność kapsuły:

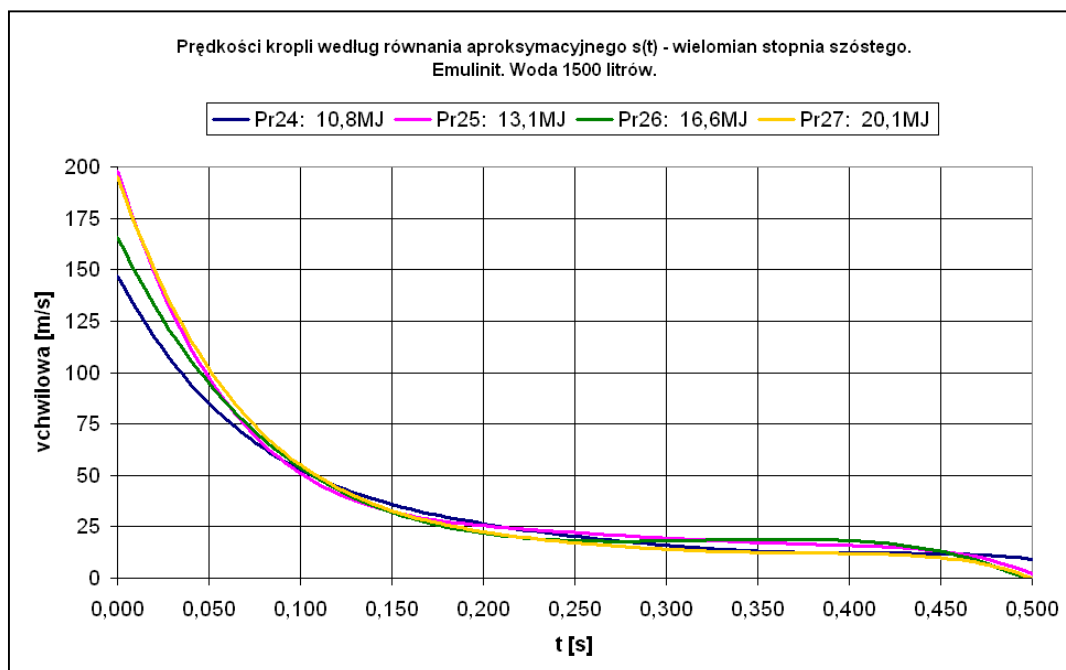
1500 l, ładunek wybuchowy: Emulinit, energia wybuchu: 16,6 MJ

6. ANALIZA WYNIKÓW

Na Rysunku 6.2.23 przedstawiona jest grupa wyników (prędkość chwilowa aerozolu wodnego w funkcji czasu rozprzestrzeniania się chmury) uzyskana dla czterech prób – masa kapsuł 1500 kg, energia wybuchu 10,8 MJ, 13,1 MJ, 16,6 MJ, 20,1 MJ. Dla każdej z prób uzyskano analogiczne wykresy prędkości chwilowych, które można scharakteryzować w następujący sposób:

- rozpędzanie kropeł aerozolu wodnego odbywa się w czasie, który jest niezauważalny na klatkach filmu, które uzyskano przy pomocy szybkiej kamery pracującej z częstotliwością 250 fps (jedna klatka filmu wykonywana co 4 ms),
- cały rejestrowany ruch kropeł aerozolu odbywa się ze zmiennym opóźnieniem,
- ekspansja kropeł odbywa się z opóźnieniem, którego największa wartość jest na początku rozprzestrzeniania i opóźnienie to maleje, w trakcie dalszego ruchu, do prawie zerowej wartości,
- dla każdej z prób można wyróżnić dwa podstawowe etapy ruchu:
 - pierwszy etap przypada dla czasów nie przekraczających około 200 ms; prędkości kropeł wynoszą od około 200 m/s do 25 m/s; etap ten charakteryzuje się dużymi wartościami opóźnień w ruchu kropeł,
 - drugi etap jest dla czasów większych od 200 ms; krople poruszają się tu z prawie stałą prędkością wynoszącą około 25 m/s,
- koniec pierwszego etapu i początek drugiego rozprzestrzeniania się kropeł pokrywa się z występowaniem punktu P2,
- wykresy prędkości chwilowych różnią się tylko wartościami prędkości kropeł w początkowych chwilach ruchu; prędkości te są tym większe, im większa jest wartość energii ładunku wybuchowego przypadająca na 1 litr wody zgromadzonej w kapsule.

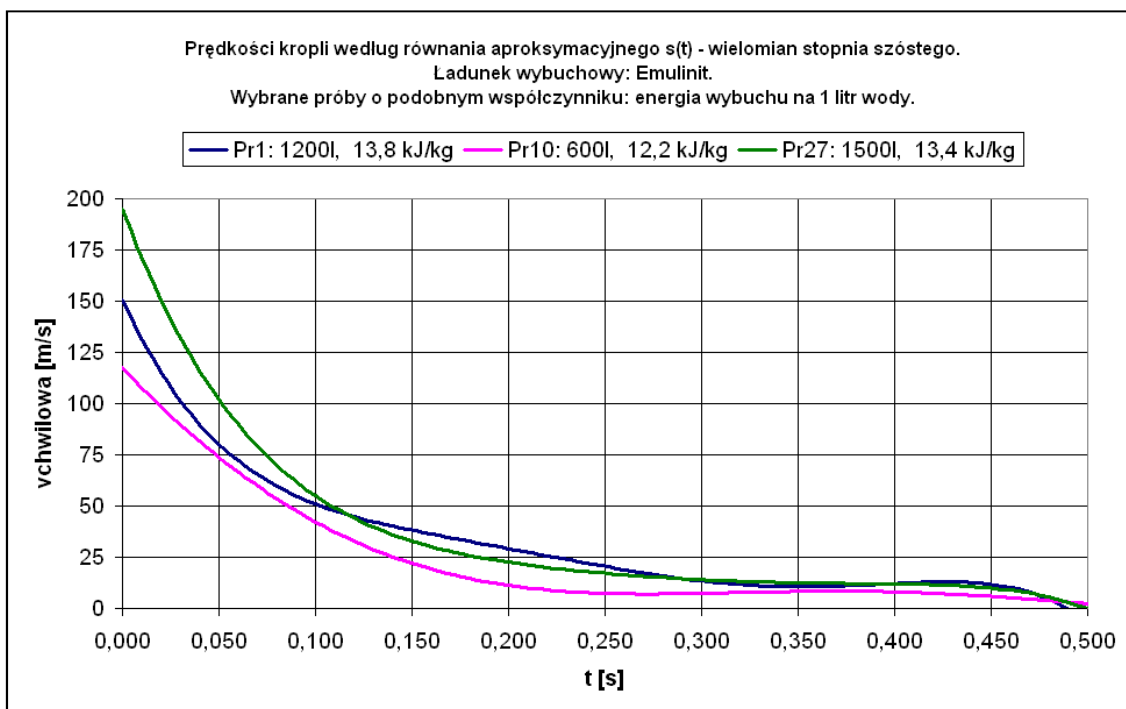
6. ANALIZA WYNIKÓW



Rysunek 6.2.23. Wykres zależności prędkości kropli aerozolu wodnego w funkcji czasu rozprzestrzeniania dla czterech próbek. Doświadczenia te wykonane zostały dla kapsuł o masie 1500 kg z różnymi wielkościami ładunków wybuchowych (Emulinit). Linia niebieska: ładunek wybuchowy 10,8 MJ, linia różowa: 13,1 MJ, linia zielona: 16,6 MJ, linia pomarańczowa: 20,1 MJ

Na Rysunku 6.2.24 zestawione są wykresy prędkości chwilowych dla próbek o różnych wielkościach kapsuł i różnych ilościach materiałów wybuchowych. Wykresy te mają podobne przebiegi i nie odbiegają znacznie od charakterystyki przedstawionej w poprzednim akapicie.

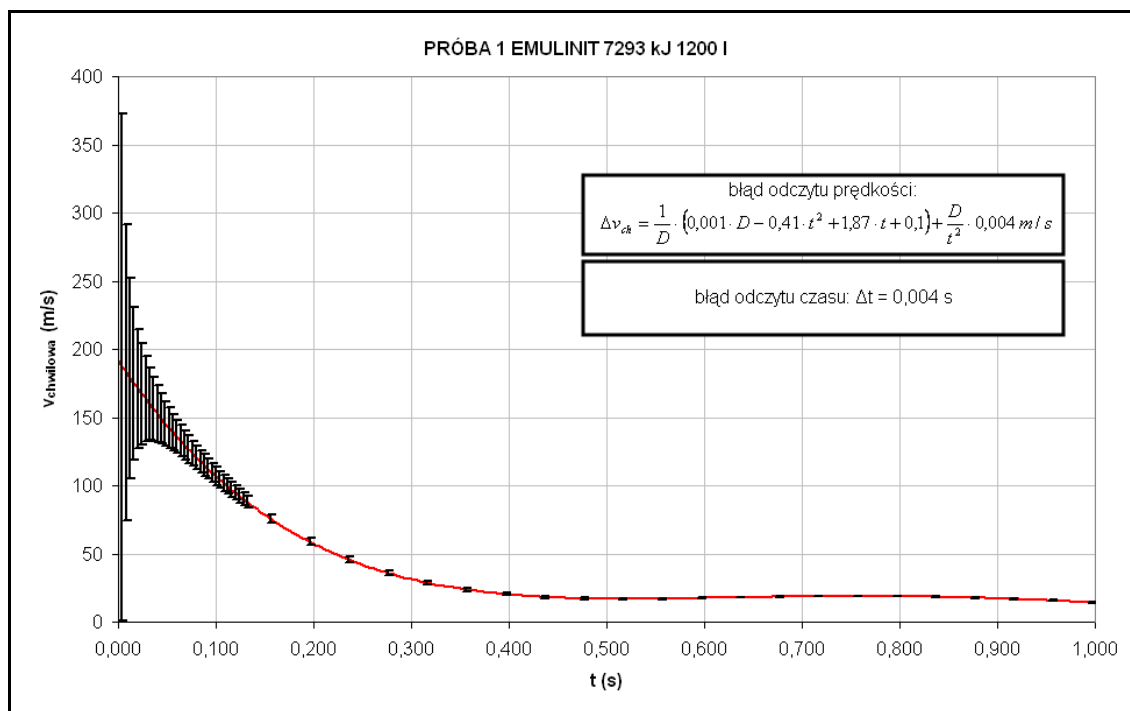
6. ANALIZA WYNIKÓW



Rysunek 6.2.24. Wykres zależności prędkości kropli aerozolu wodnego w funkcji czasu rozprzestrzeniania dla trzech próbek. Doświadczenia te wykonane zostały dla kapsuł o różnych masach wody i różnych wielkości ładunków wybuchowych (Emulinit). Linia niebieska: masa kapsuły 1200 kg, ładunek wybuchowy 16,1 MJ, linia różowa: masa kapsuły 600 kg, ładunek wybuchowy 7,3 MJ, linia zielona: masa kapsuły 1500 kg, ładunek wybuchowy 20,1 MJ. Próby te charakteryzują się zbliżoną wartością energii wybuchu w odniesieniu do 1 kg wody zgromadzonej w kapsule (13,8 kJ/kg, 12,1 kJ/kg, 13,4 kJ/kg)

Rachunek błędu dla oszacowania prędkości chwilowej kropli aerozolu wodnego przedstawiony jest w Załączniku nr 3. Ze względu na czytelność wykresów zbiorczych (Rysunek 6.2.23 i Rysunek 6.2.24) nie zostały na nie naniesione słupki błędów. Wielkość błędu pomiarowego przedstawiono na Rysunku 6.2.25.

6. ANALIZA WYNIKÓW

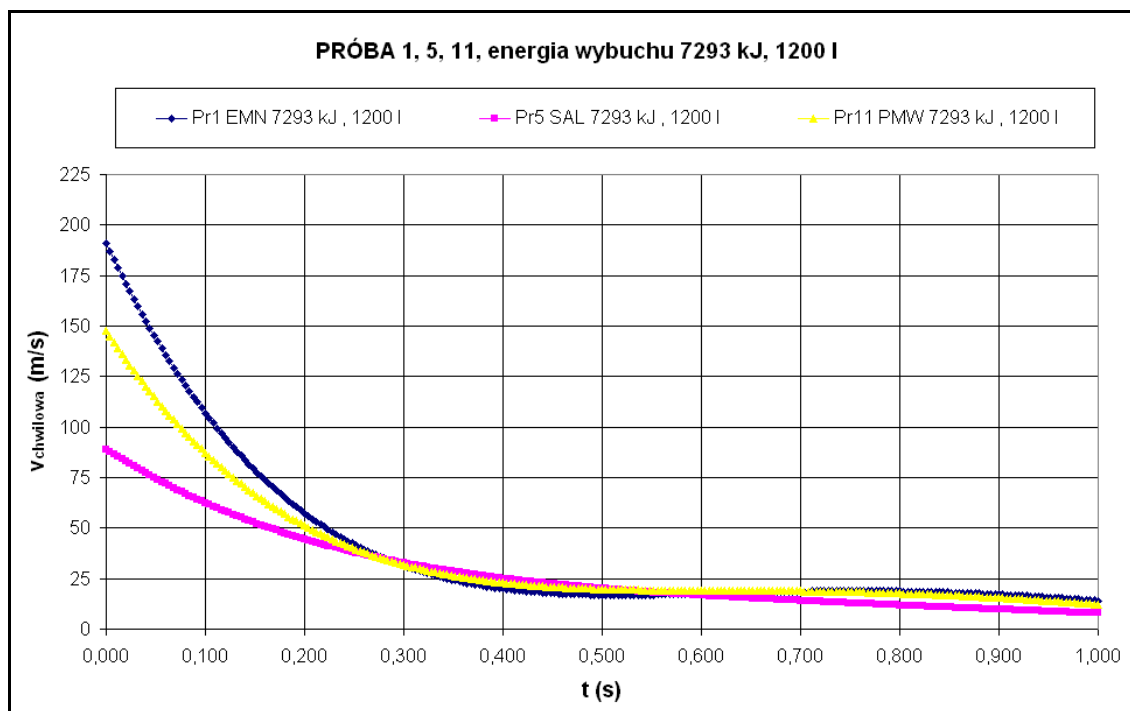


Rysunek 6.2.25. Błąd pomiarowy wyznaczenia prędkości chwilowej kropli aerozolu wodnego uzyskany na podstawie oszacowań przedstawionych w Załączniku nr 3.

Wykres prędkości dla próby 1200 l z ładunkiem Emulinitu o energii wybuchu 7393 kJ

Prędkość chwilowa kropli aerozolu wodnego (czoła chmury) jest największa dla Emulinitu.

Największy zasięg chmury aerozolu wodnego uzyskiwany jest również dla Emulinitu. Analizowane ładunki wybuchowe różnią się zasadniczo w jednym elemencie: prędkości detonacji ładunku wybuchowego – Tabela 6.1.



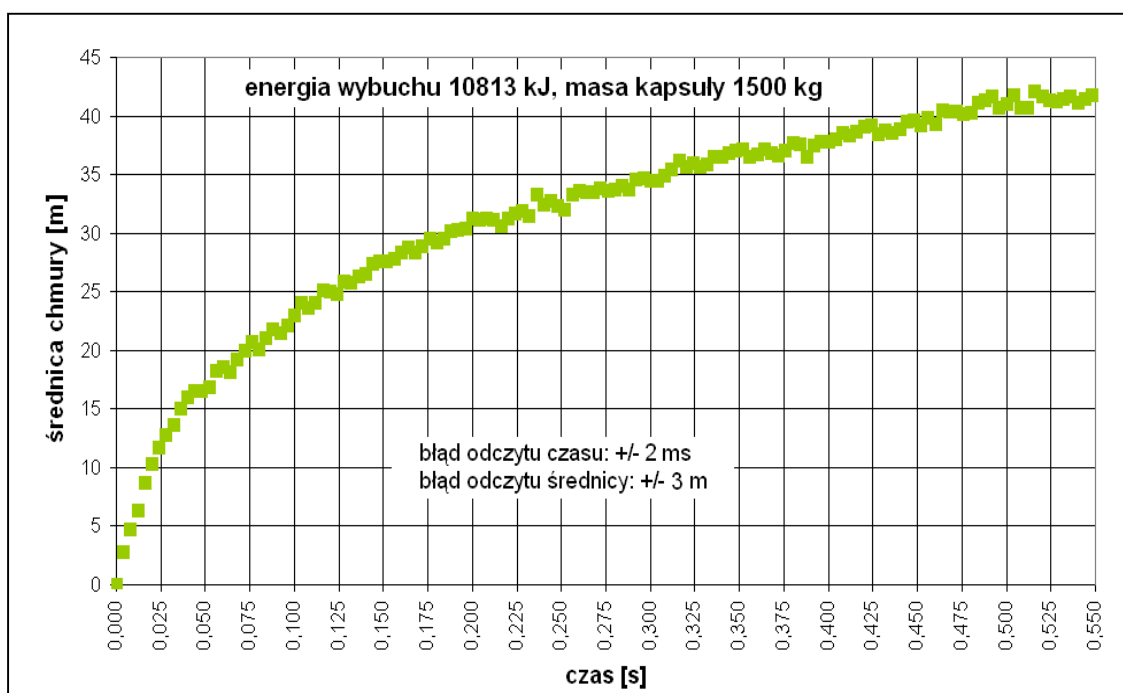
Rysunek 6.2.26. Prędkość chwilowa kropeł aerozolu wodnego dla trzech prób, różniących się tylko rodzajem ładunku wybuchowego (ilość wody 1200 l, energia wybuchu 7293 kJ). Wykresy pokazują, iż największe prędkości są dla Emulinitu, choć nie ma on największej prędkości detonacji (Tabela 6.1)

Hipoteza wyjaśniająca występowanie punktu P2 jest następująca:

- ✓ woda zgromadzona w kapsule zostaje podzielona, w chwili eksplozji, na N jednakowych kropeł, które są następnie rozpędzane do prędkości poddźwiękowych (100 m/s do 200 m/s),
- ✓ w początkowej fazie ruchu na krople aerozolu wodnego działa relatywnie duża siła oporu, której skutkiem jest podział kropeł; nowo powstałe krople poruszają się z mniejszymi prędkościami, niż krople z których one powstały (zjawisko to będzie nazywane w tej pracy jako „obdzieranie kropeł”),
- ✓ podział kropeł odbywa się do chwili, gdy krople aerozolu wodnego będą miały na tyle małe rozmiary i prędkości dla których nie będzie możliwy podział (siła oporu aerodynamicznego powodująca podział jest wprost proporcjonalna do powierzchni kropeł i kwadratu ich prędkości),
- ✓ koniec obszaru podziału kropeł to punkt P2 (koniec obszaru obdzierania).

6.3 POWSTAWANIE I ROZPRZESTRZENIANIE SIĘ CHMURY AEROZOLU WODNEGO PODCZAS ZRZUTU KAPSUŁY

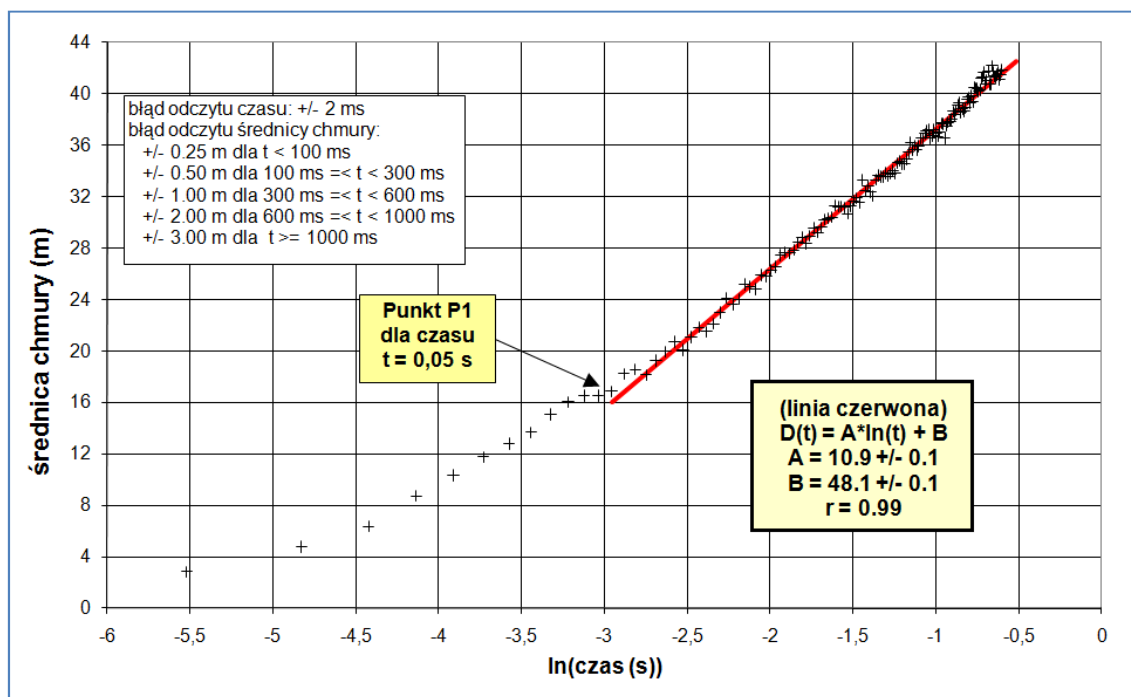
Trzeci etap doświadczeń polegał na analizie rozprzestrzeniania się chmury aerozolu wodnego kapsuł, które zrzucone były z helikoptera. Ich lot rejestrowany był przy pomocy szybkiej kamery - 250 fps co pozwoliło dokładne prześledzenie rozprzestrzeniania się chmury aerozolu wodnego. Podczas tych badań potwierdzone zostały wszystkie wnioski wyciągnięte w poprzednim podrozdziale. Na Rysunku 6.3.1 przedstawione są przykładowe wyniki - wykres zależności średnicy chmury aerozolu od czasu rozprzestrzeniania: $D = f(t)$. Wykres ten jest zbliżony w wynikami przedstawionymi na przykład na Rysunku 6.2.10.



Rysunek 6.3.1. Zależność średnicy chmury aerozolu wodnego od czasu rozprzestrzeniania; energia wybuchu 10,8 MJ; ładunek wybuchowy: Emulinit; masa kapsuły 1500 kg; próba zarejestrowana szybką kamerą (250 klatek na sekundę); próba polegała na uwolnieniu kapsuły przez helikopter – rzut poziomy

6. ANALIZA WYNIKÓW

Zależność $D = f(\ln(t))$, dla jednej z prób, w której kapsuła została zrzucona z helikoptera, przedstawiona jest na Rysunku 6.3.1. Na wykresie tym można wyróżnić „obszar nieliniowy” oraz „obszar Bernoulliego”, w którym nie występuje punkt P2, dla którego gwałtownie zmienia się współczynnik oporu aerodynamicznego. „Obszar rozpędzania” przypada dla czasu około 50 ms i ta wartość jest zbliżona do rezultatów jakie uzyskiwane były w próbach „statycznych” – Tabela 6.2.2. Brak punktu P2 pokrywa się z hipotezami stawianymi w poprzednich podrozdziałach: energia wybuchu 10,8 MJ w odniesieniu do 1500 l wody, nie pozwala na nadanie kropelkom aerozolu zbyt dużych prędkości początkowych, dlatego cały ich ruch odbywa się w obszarze podkrytycznym. Na Rysunku 6.3.1 nie jest wyszczególniony „obszar Stokesa” ponieważ rejestrowanie lotu szybką kamerą wykonane było dla pierwszych 600 ms począwszy od detonacji głównego ładunku wybuchowego. Zasięg chmury aerozolu w końcowych chwilach jej rejestracji jest zbliżony ze średnicami uzyskiwanymi w próbach „statycznych”.



Rysunek 6.3.2. Zależność średnicy chmury aerozolu wodnego od czasu rozprzestrzeniania przedstawionego na skali logarytmicznej; energia wybuchu 10813 kJ; ładunek wybuchowy: Emulinit; masa kapsuły 1500 kg; próba zarejestrowana szybką kamerą (250 klatek na sekundę); próba polegała na uwolnieniu kapsuły przez helikopter – rzut poziomy

Kapsuły wodne w rzeczywistych warunkach będą zrzucane z helikoptera. Omawiane na początku tego rozdziału (rozdział 6.1 i 6.2) obserwacje dotyczyły „prób statycznych” (kapsuła zamocowana na linie). Po przeprowadzeniu prób helikopterowych można stwierdzić, iż modelowanie „statyczne” jest w wystarczający sposób zbliżone do modelowania „dynamicznego”. Zarówno zasięg jak i kształt chmury odpowiada przewidywaniom. Brak rotacji podczas spadku możliwy jest do uzyskania przy zastosowaniu spadochronu podczepionego do kapsuły (Rysunek 6.3.2). Kształt chmury aerozolu zależy od ułożenia osi kapsuły względem normalnej poprowadzonej od powierzchni pożaru. Im mniejsza jest ta różnica (kąt), tym rezultaty są bardziej przewidywalne (zbliżone do prób „statycznych”). Na Rysunku 6.4.4 przedstawione są przykładowe klatki filmu ukazujące formownie się chmury aerozolu wodnego. Rozmieszczenie ładunku wybuchowego wewnątrz kapsuły zgodne jest z Rysunkiem 6.3.



Rysunek 6.3.3. Brak rotacji kapsuły przy rzucie poziomym z prędkością początkową 50 km/h z wysokości 127,8 m (lot 2)

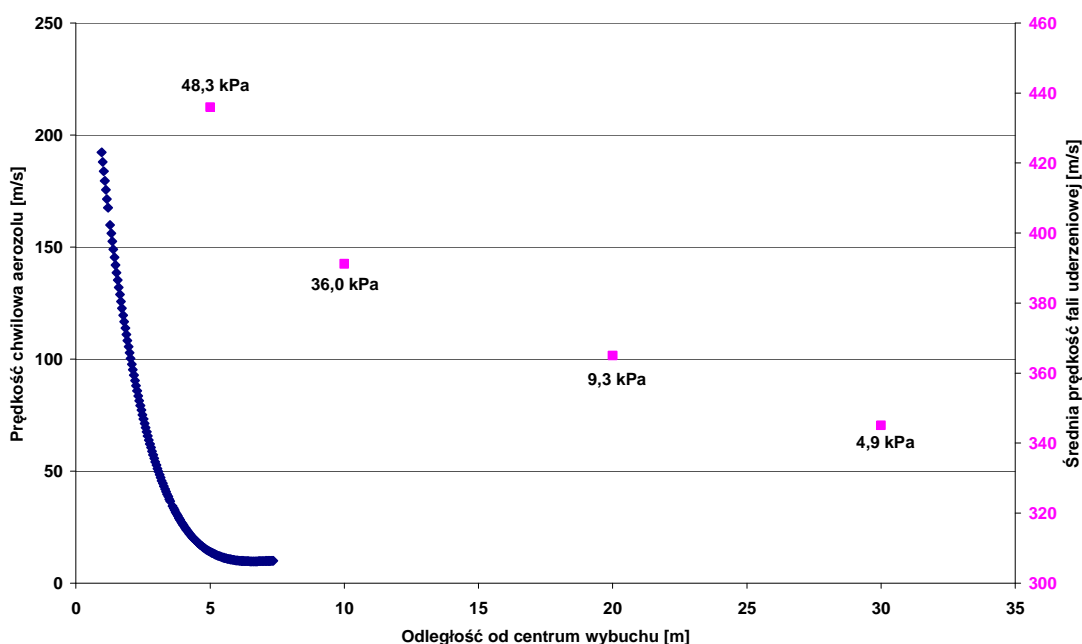


Rysunek 6.3.4. Formowanie się chmury aerozolu wodnego podczas lotu (lot 6). Kapsuła została uwolniona przez helikopter z zawisu. Ładunek wybuchowy (Emulinit) umieszczony w konfiguracji cylindrycznej – Rysunek 2.1

6.4 PORÓWNANIE WYNIKÓW DLA FALI UDERZENIOWEJ I OBŁOKU AEROZOLU WODNEGO

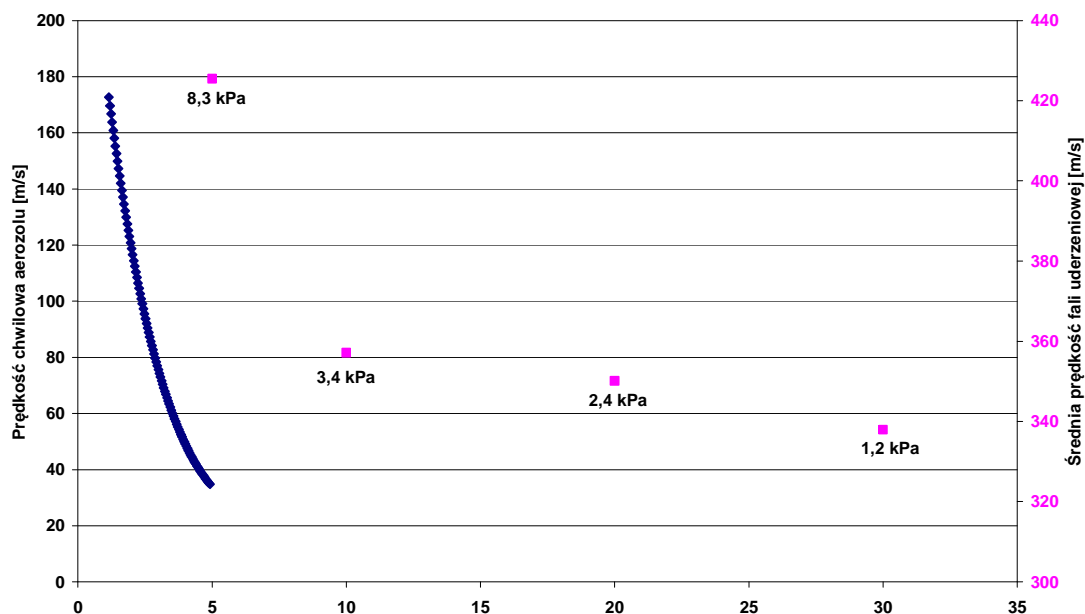
Wykonanie pomiarów dotyczących rozprzestrzeniania się czoła fali uderzeniowej oraz czoła chmury aerozolu wodnego pozwala na zestawienie obu wyników i możliwość analizy. Dodatkowo zestawienie to można poszerzyć o odczyty z czujników ciśnienia.

Na rysunkach od 6.4.1 do 6.4.3 przedstawiono porównanie prędkości rozchodzenia się aerozolu wodnego ze średnią prędkością fali uderzeniowej oraz wartościami ciśnień w funkcji odległości od centrum eksplozji dla wybranych prób (Saletrol, PMW, Emulinit). Wykresy te są do siebie bardzo podobne. Różnice występują w wartościach poszczególnych parametrów, co jest związane z użyciem różnych wielkości ładunków wybuchowych (energii detonacji).

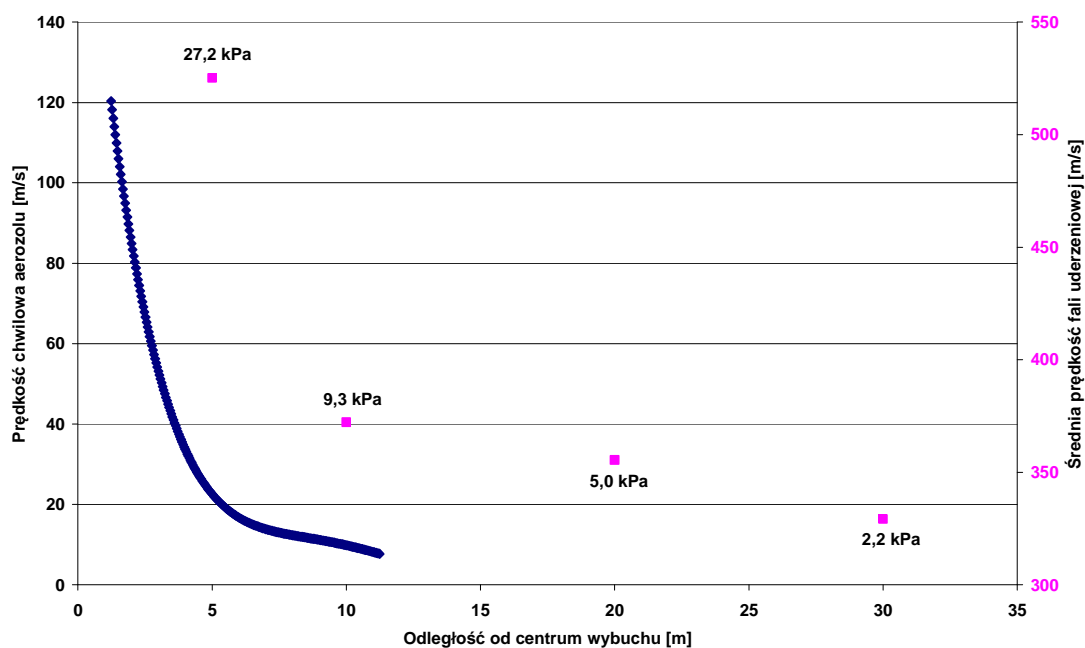


Rysunek 6.4.1. Wykres prędkości chwilowej aerozolu wodnego oraz prędkości średniej i ciśnienia fali uderzeniowej dla próby z ładunkiem Saletrolu o energii wybuchu 20092 kJ, worek 1200 litrów

6. ANALIZA WYNIKÓW



Rysunek 6.4.1. Wykres prędkości chwilowej aerozolu wodnego oraz prędkości średniej i ciśnienia fali uderzeniowej dla próby z ładunkiem PMW o energii wybuchu 10784 kJ, worek 1200 litrów



Rysunek 6.4.1. Wykres prędkości chwilowej aerozolu wodnego oraz prędkości średniej i ciśnienia fali uderzeniowej dla próby z ładunkiem Emulinitu o energii wybuchu 4384 kJ, worek 600 litrów

6. ANALIZA WYNIKÓW

Wyniki te wskazują, że proces produkcji aerozolu wodnego, powstałego w wyniku eksplozji ładunku wybuchowego wewnątrz kapsuły wodnej, odbywa się w następujący sposób:

- ⇒ energia ładunku wybuchowego zużywana jest do fragmentacji wody oraz do wytworzenia obszaru wysokiego ciśnienia, które odpowiedzialne jest za nadanie kroplom wody pewnych prędkości początkowych;
- ⇒ powstała przy detonacji fala rozprzestrzenia się ze znacznie większą prędkością niż krople (czoło fali bardzo szybko wyprzedza krople aerozolu);
- ⇒ proces wyhamowania czoła fali uderzeniowej przebiega znacznie wolniej od czoła chmury aerozolu;
- ⇒ w początkowej fazie procesu prędkość czoła fali jest około 2,5-krotnie większa od obłoku wodnego;
- ⇒ wyhamowanie czoła chmury odbywa się w promieniu około 10 m od centrum eksplozji;
- ⇒ wyhamowanie czoła fali uderzeniowej odbywa się w promieniu około 30 m od centrum eksplozji (dla tej odległości notuje się prędkości równe prędkości dźwięku w powietrzu).

6.5 POMIAR WIELKOŚCI KROPEL AEROZOLU WODNEGO

W wyniku detonacji ładunku wybuchowego woda umieszczona w kapsule ulega fragmentacji, a powstałe cząstki uzyskują pewną prędkość początkową. Po kilku milisekundach od wybuchu rozprzestrzeniają się one ruchem opóźnionym. W tym czasie, ze względu na dużą prędkość, oddziaływuje na nie znaczna siła oporu, która jest wprost proporcjonalna do przekroju osiowego kropli. Siła ta powoduje ich podział (tzw. „obdzieranie kropeł”) na cząstki mniejsze [40]. Proces ten trwa aż do momentu, kiedy to krople będą miały na tyle małą prędkość i średnicę, że podział nie będzie możliwy. Wielkość kropeł aerozolu wodnego zmienia się w czasie rozprzestrzeniania chmury, a z punktu widzenia zastosowań wybuchowego aerozolowania najistotniejsze są średnice uzyskiwane na końcu.

Niniejszy rozdział zawiera wyniki pomiaru wielkości kropeł aerozolu wybuchowego, powstałego podczas aerozolowania wybuchowego. Wyniki uzyskano na podstawie dwóch niezależnych metod pomiarowych. Dzięki temu możliwe jest porównanie rezultatów z obu metod, co w konsekwencji pozwoli uwiarygodnić obie metody, względnie zakwestionować jedną z nich. Pomiaru wielkości kropeł, dla kapsuł o pojemności około 1000 l, dotychczas nikt nie wykonywał.

Rozdział 6.5.1 zawiera wyniki szacowania wielkości kropeł aerozolu wodnego na podstawie prędkości opadania aerozolu.

Rozdział 6.5.2 zawiera wyniki pomiaru wielkości kropeł aerozolu wodnego, które uzyskane zostały przy wykorzystaniu rejestratora kropeł.

6.5.1 METODA OPADANIA

Pomiar wielości cząstek aerozolu można przeprowadzić kilkoma sposobami. Pierwszy z nich dotyczy cząstek, które przemieszczają się w kierunku pionowym, a polega on na analizie prędkości opadania chmury. Podczas spadku swobodnego na każdą kroplę działa siła ciężkości oraz siła oporu. Gdy siły te zrównoważą się, wówczas krople będą przemieszczały się ruchem jednostajnym.

Siła ciężkości oraz oporu dane są wzorami [68]:

$$P = \rho g V , \quad (6.5.1.1)$$

$$R = 6\pi r \eta v , \quad (6.5.1.2)$$

gdzie:

ρ - gęstość kropli (kg/m^3),

g - przyspieszenie ziemskie (m/s^2),

V - objętość kropli (m^3), $V = 4/3 \cdot \pi r^3$,

r - promień kropli (m),

η - współczynnik lepkości dynamicznej powietrza (Ns/m^2), $\eta = 1,83 \cdot 10^{-5}$
 Ns/m^2 ,

v - prędkość opadania kropli (m/s).

Przyrównanie wzorów (6.5.1.1) i (6.5.1.2) prowadzi do zależności wyrażającej promień kropli aerozolu wodnego

$$r = \sqrt{\frac{9\eta v}{2\rho g}} . \quad (6.5.1.3)$$

Analiza filmów obrazujących opadanie chmury aerozolu wodnego pozwala na określenie prędkości omawianego ruchu jednostajnego, a na jej podstawie możliwe będzie określenie średnicy kropeł. Ze względu na niejednorodność ich wielości, dolny i górny obrys chmury będzie przemieszczał się z różnymi prędkościami. Wielkości te będą krańcowymi wartościami prędkości opadania kropeł. Z teoretycznego punktu widzenia metoda ta pozwoli na wyznaczenie przedziału średnic oraz nie pozwoli na

6. ANALIZA WYNIKÓW

wyznaczenie rozkładu statystycznego. Omawiana tu metoda wyznaczenia średnic kropeł aerozolu wymagała stosowania kamer cyfrowych dużej rozdzielczości i wyspecjalizowanego oprogramowania. Do tego etapu doświadczeń wykorzystana została kamera wysokiej rozdzielczości Sony HDR-FX1E (rozdzielczość obrazu 1440x1080, częstotliwość pracy 25 fps).

Wyznaczenie prędkości opadania aerozolu opierało się na rejestrowaniu położenia górnych fragmentów chmury w funkcji czasu rejestrowanego od chwili detonacji ładunku wybuchowego. Dwie klatki filmu z zaznaczonymi położeniami chmury aerozolu względem wybranego poziomu odniesienia przedstawione są na rysunkach 6.5.1.1 i 6.5.1.2. Przemieszczenie pionowe aerozolu można tu określić na podstawie zmiany położenia $\Delta H = H_1 - H_2$ w odniesienia do czasu w jakim ono nastąpiło (oznaczenia zgodne z rysunkami 6.5.1.1 i 6.5.1.2).



Rysunek 6.5.1.1. Wyznaczenie położenia górnego obrysu chmury aerozolu wodnego względem wybranego poziomu odniesienia – początkowe chwile opadania aerozolu (porównaj z rysunkiem 6.5.1.2)



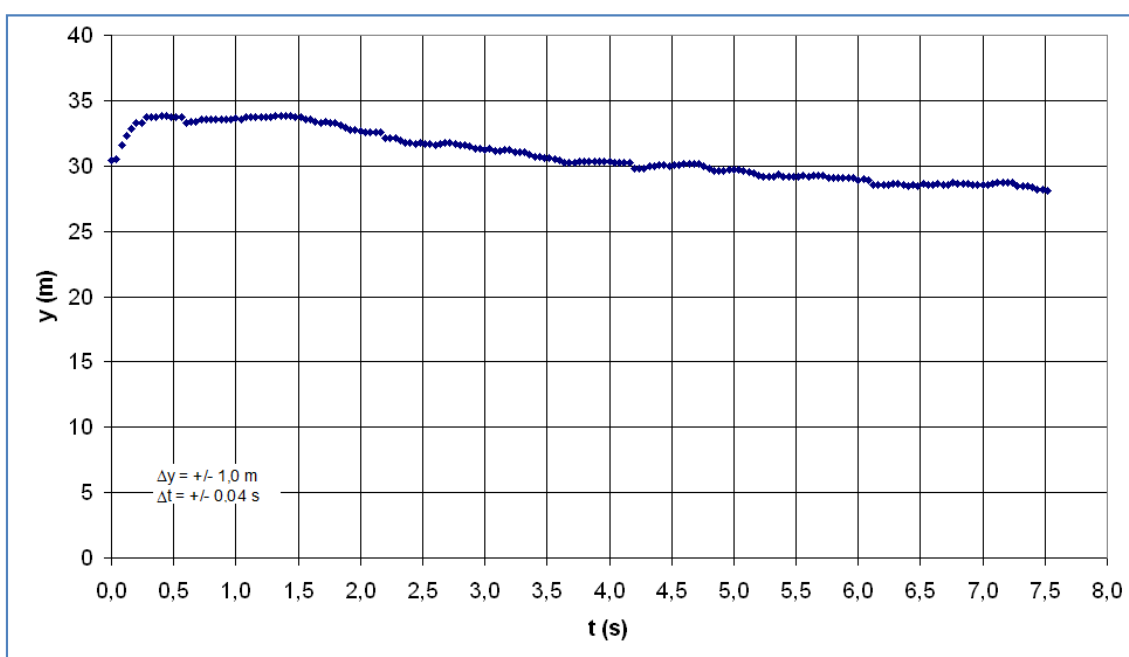
Rysunek 6.5.1.2. Wyznaczenie położenia górnego obrysu chmury aerozolu wodnego względem wybranego poziomu odniesienia – późniejsze chwile opadania aerozolu (porównaj z rysunkiem 6.5.1.2)

Pomiar wielkości kropeł metodą opadania pozwala na wyznaczenie pewnej średniej wielkości kropeł na górnej krawędzi obłoku aerozolu. Nie wiadomo nawet jakiego rodzaju jest to średnia, a w związku z tym nie należy traktować tej metody jako samodzielnej. Powiązanie wyników uzyskanych metodą opadania z metodą optyczną pozwoli właściwie zinterpretować wyniki. W związku z tym uzyskane w ten sposób rezultaty należy traktować jako pewnego rodzaju przybliżenie, które pozwoli na kalibrację aparatury mierzącej wielkość kropeł metodą optyczną („przechwytywania” kropeł).

Pomiar prędkości opadania wykonany został na podstawie śledzenia wybranych fragmentów chmury aerozolu wodnego. Przykładowa seria uzyskanych wyników dla jednej z prób przytoczona jest na Rysunku 6.5.1.3. Wykres przedstawia położenie górnego obrysu chmury w funkcji czasu rozprzestrzeniania się aerozolu. Wykresy tego rodzaju charakteryzują się tym, iż w początkowej fazie ekspansji aerozol wznosi się ku górze, po czym zaczyna opadać, przy czym opadanie najpierw odbywa się ruchem przyspieszonym, a później jednostajnym. Na podstawie analizy wielu doświadczeń ustalono arbitralnie, iż o jednostajnym opadaniu kropeł aerozolu wodnego można mówić, gdy upłynęło co najmniej 5 sekund od początku ekspansji aerozolu. W związku

6. ANALIZA WYNIKÓW

z tym wszystkie przeprowadzone analizy dotyczą czasów od 5-tej sekundy ruchu do około 8-mej sekundy, kiedy to aerozol jest na tyle rozrzedzony, że niemożliwe jest dokładne określenie jego położenia. W podrozdziale tym przedstawione zostały opracowania wyników pomiarów średnic kropelek wody przylegających do płytki, w których wykorzystywana została metoda optyczna wspomagana rejestratorem kropelek wody. Przeprowadzone zostały dwie serie prób, które różniły się rodzajem płytki szklanej na którą nanoszone były krople wody.

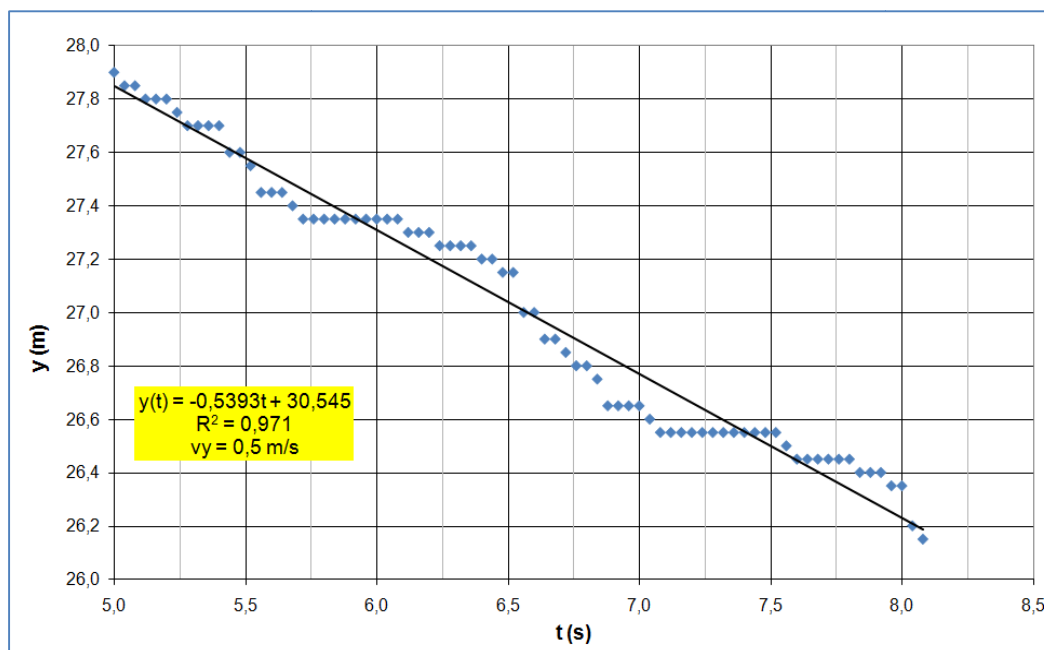


Rysunek 6.5.1.3. Przykładowa seria danych (położenie górnego obrysu chmury aerozolu) uzyskana dla jednej z prób (kapsuła z wodną o pojemności 1500 l z ładunkiem Emulinitu o energii wybuchu 10784 kJ)

Wyznaczenie prędkości opadania aerozolu polegało na dopasowaniu funkcji liniowej do wykresu zależności wysokości od czasu poczynając od piątej sekundy rozprzestrzeniania. Na podstawie otrzymanej funkcji liniowej możliwe było określenie szybkości spadku jako pierwszej pochodnej po czasie (współczynnika kierunkowego prostej). Przykład wyznaczenia szybkości opadania aerozolu przytoczony jest na Rysunku 6.5.1.4, gdzie punkty niebieskie to dane pomiarowe, linia czerwona to

6. ANALIZA WYNIKÓW

aproxymacja funkcją liniową. Równanie wraz z wartością współczynnika korelacji oraz rezultat przedstawione są na rysunku na żółtym polu (szybkość opadania oznaczono jako „ v_y ”).



Rysunek 6.5.1.4. Przykładowa seria danych (położenia górnego obrysu chmury aerozolu) uzyskana dla jednej z prób. Do danych pomiarowych dopasowano funkcję liniową w celu określenia prędkości opadania aerozolu wodnego (kapsuła z wodą o pojemności 1500 l z ładunkiem Emulinitu o energii wybuchu 10784 kJ). Nachylenie wykresu jest poszukiwaną prędkością opadania kropeł aerozolu, która w tym przypadku wynosi 0,5 m/s. Dopasowanie krzywej do punktów pomiarowych odbywa się dla przedziału czasu od 5 s do końca rejestracji opadania

Wyznaczenie błędu pomiarowego w opisanym powyżej metodzie jest dosyć trudne, ponieważ głównym przyczynkiem do niepewności pomiarowej jest dokładność wskazania położenia opadającej chmury aerozolu wodnego. Osoba analizująca poszczególne klatki filmu popełnia błędy w dokładnym określeniu położenia aerozolu. Ponadto można śledzić różne fragmenty opadającego aerozolu, które to mogą przemieszczać się z różnymi (choć zbliżonymi) prędkościami. Przytoczone błędy w ustaleniu położenia aerozolu są niezależne i przypadkowe, a zatem wykonanie pomiarów wielokrotnie dla tych samych danych powinno dać wynik oscylujący wokół

wartości właściwej. W związku z tym wszystkie dostępne dane doświadczalne zostały jedenastokrotnie, niezależnie od siebie przebadane, a na ich podstawie obliczona została średnia ze wzoru [66]

$$\overline{vy} = \frac{\sum_{i=1}^N vy_i}{N} \quad (6.5.1.4)$$

gdzie:

vy_i - prędkość opadania dla i -tego pomiaru ($i \in \{1, 2, \dots, 11\}$, $N = 11$).

Średnia \overline{vy} , zgodnie z teorią błędu, jest najlepszym estymatorem wartości właściwej (która tutaj, ze względu na pewne nierównomierności w opadaniu aerozolu, nie jest jednoznaczna). Takie wyznaczenie wartości \overline{vy} zakłada, iż błędy systematyczne są na tyle małe, że mogą być zaniedbane. Błąd w wyznaczeniu szybkości opadania (\overline{vy}) obliczony został na podstawie poniższego wzoru [69, 70]

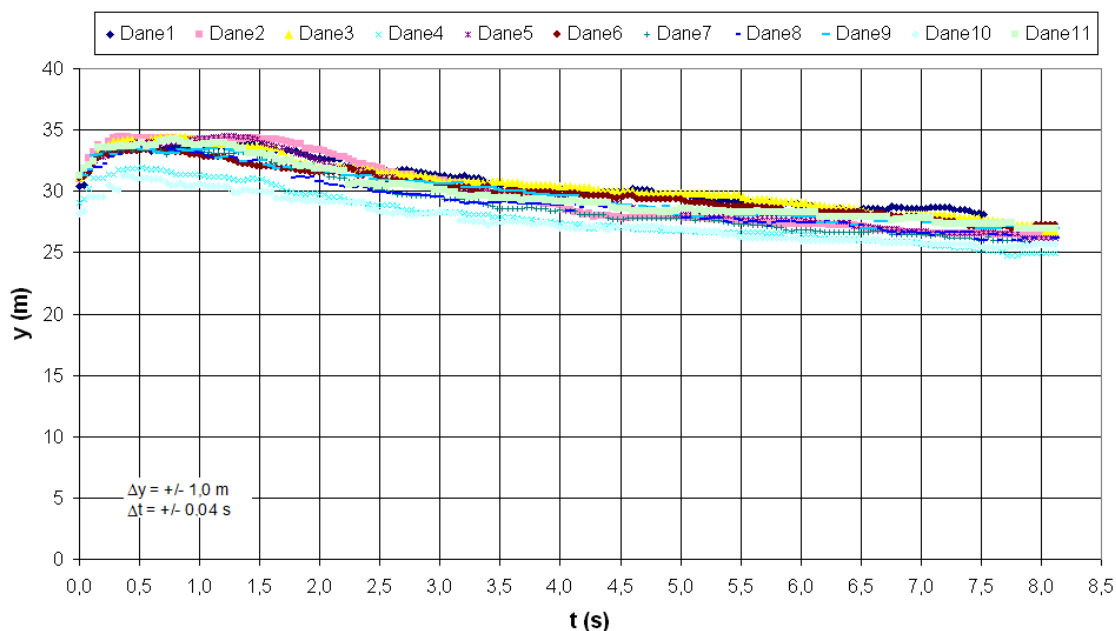
$$S_{\overline{vy}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (vy_i - \overline{vy})^2}{N(N-1)}} \quad (6.5.1.5)$$

Wzór ten określany jest w literaturze jako niepewność standardowa średniej arytmetycznej serii pomiarów [69, 70]. Jako błąd wyznaczenia prędkości opadania chmury aerozolu wodnego przyjęto trzykrotną wartość $S_{\overline{vy}}$ (standardowa procedura stosowana w wyznaczaniu błędów pomiarowych, wiążąca się z tym, że większość błędów niezależnych i przypadkowych ma rozkład Gaussa, w którym prawdopodobieństwo wyznaczenia badanej wielkości w przedziale $x \pm 3 \cdot S_x$ wynosi około 99,7% [69, 70]).

Na Rysunku 6.5.1.5 przedstawione zostały wyniki jedenastu niezależnych pomiarów położenia chmury aerozolu względem wybranego poziomu odniesienia dla jednej z prób (kapsuła wodna o pojemności 1500 l z ładunkiem wybuchowym Emulinitem o energii wybuchu 10784 kJ). Widoczne tu różnice w położeniu aerozolu wodnego wynikają z śledzenia różnych fragmentów aerozolu wodnego i nie są wynikiem błędnych

6. ANALIZA WYNIKÓW

odczytów. Poszczególne wyniki pomiarowe (od Dane 1 do Dane 11) układają się w podobne pod względem kształtu krzywe, co świadczy o tym, że prędkość opadania jest we wszystkich przypadkach zbliżona (mała różnica względem średniej arytmetycznej).

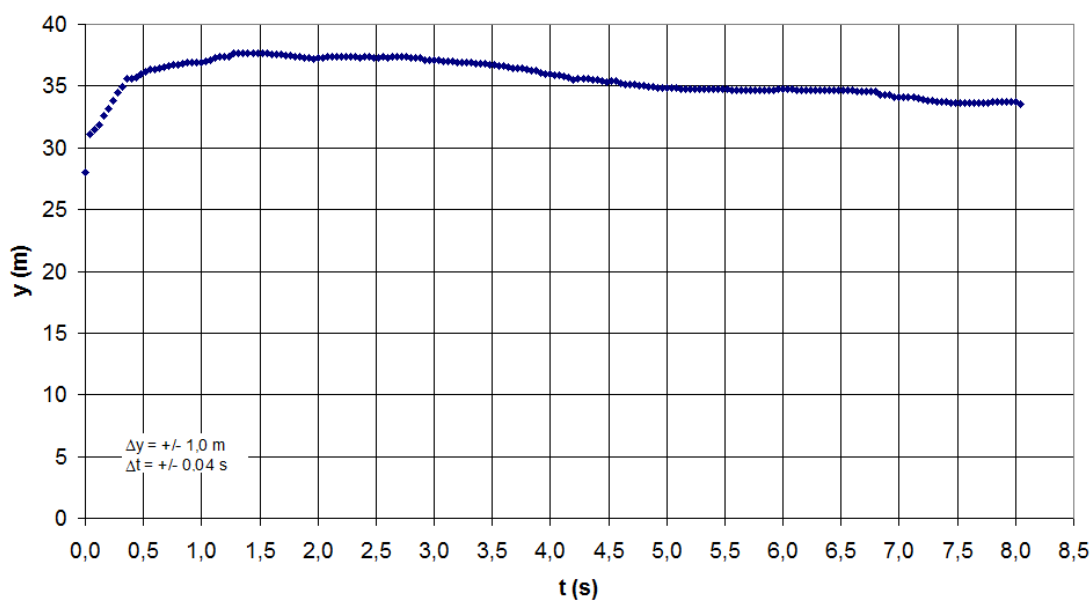


Rysunek 6.5.1.5. Serie danych (położenie górnego obrysu chmury aerozolu) uzyskane przez jedenastokrotne prześledzenie różnych fragmentów opadającej chmury aerozolu (kapsuła z wodą o pojemności 1500 l z ładunkiem Emulinitu o energii wybuchu 10784 kJ)

Na Rysunku 6.5.1.6 przedstawiony jest wynik opadania dla próby, w której medium aerozolowanym była woda z dodatkiem alkoholu izobutyłowego (850 l wody, 200 l alkoholu izobutyłowego). Można tu zauważyć odmienny kształt krzywej w odniesieniu do prób, w których wykorzystywana była tylko woda. Na rysunku 6.5.1.7 przytoczono, w celu lepszego zobrazowania tej sytuacji, dwie typowe próby w których użyto samej wody oraz wody z dodatkiem alkoholu. Krzywa wodno-alkoholowa jest bardziej płaska, co świadczy o tym, że krople aerozolu znacznie wcześniej opadają ruchem jednostajnym. Można tu wysunąć hipotezę, iż obniżenie napięcia powierzchniowego wody powoduje wytworzenie mniejszych kropeł (w odniesieniu do prób z samą wodą), które następnie nie ulegają podziałowi na mniejsze – nie występuje tu zjawisko „obdzierania kropeł”. Przemawia za tym fakt, że mniejsze krople mają mniejsze

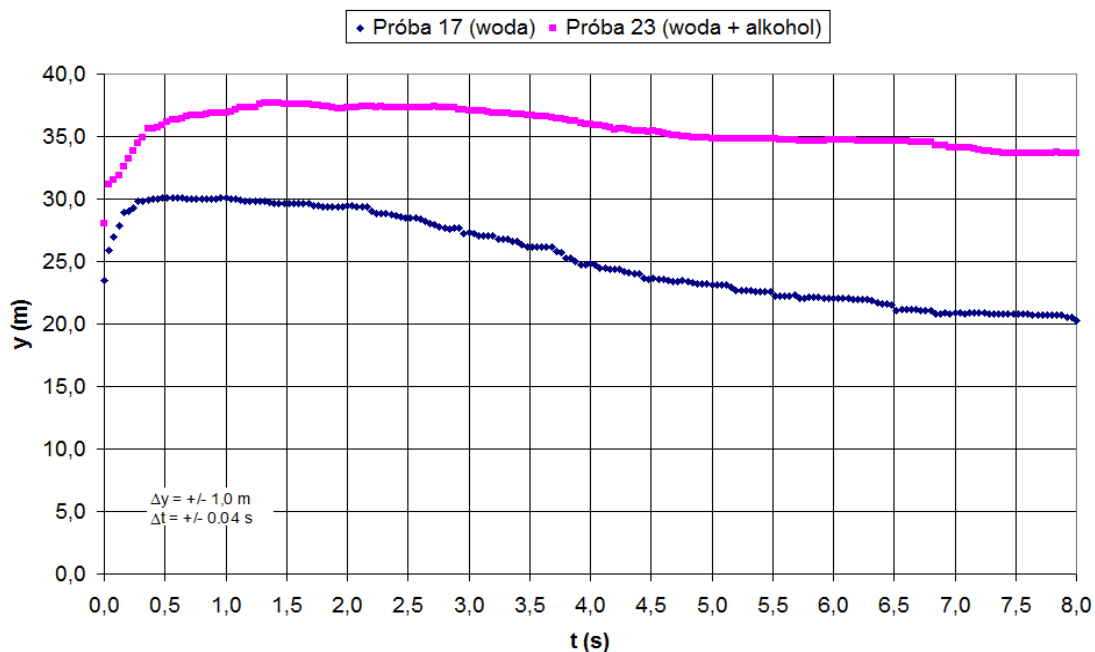
6. ANALIZA WYNIKÓW

powierzchnie czołowe, a od nich zależy siła oporu aerodynamicznego będącego przyczyną „obdzierania kropeł” (siła oporu aerodynamicznego jest wprost proporcjonalna do przekroju osiowego kropli). Jeśli krople są mniejsze zjawisko podziału kropli jest zahamowane lub wręcz niemożliwe, przy założeniu, że krople uzyskane z samej wody i z wody z dodatkami uzyskują te same (zbliżone) prędkości początkowe. Ponieważ próby wykonywane były z ładunkami wybuchowymi tego samego rodzaju i o tej samej energii wybuchu, założenie o uzyskaniu przez krople aerozolu zbliżonych prędkości początkowych wydaje się być uzasadnione.



Rysunek 6.5.1.6. Krzywa opadania aerozolu dla próby w której wykorzystana została woda z dodatkiem alkoholu izobutyłowego (850 l wody i 200 l alkoholu)

6. ANALIZA WYNIKÓW



Rysunek 6.5.1.7. Porównanie krzywych opadania dla wody (linia niebieska) oraz wody z dodatkiem alkoholu (linia różowa)

Na podstawie analizy wszystkich przeprowadzonych doświadczeń uzyskano średnią średnicę kropeł aerozolu wynoszącą: $(140 \pm 25) \mu\text{m}$. Należy tu jeszcze raz wspomnieć, że metoda opadania pozwala na wyznaczenie wielkości kropeł dla wąskiej frakcji powstałego aerozolu wodnego. Zatem należało by powiedzieć, że metoda opadania pozwoliła na zaobserwowanie średnic kropeł o wielkości $(140 \pm 25) \mu\text{m}$. Przedstawione wyniki pomiaru średnic kropeł w metodzie optycznej (kolejny rozdział pracy) pozwala na wyznaczenie wielkości zupełnie innej frakcji zatem porównanie wyników z obu metod musi uwzględniać ten fakt.

6.5.2 METODA OPTYCZNA WYKORZYSTUJĄCA REJESTRATOR KROPEL WODY

Wyznaczanie rozkładów średnic kropeł wody w tej metodzie polega na naniesieniu badanych kropeł wody na szklaną płytkę, a następnie wyznaczeniu, z wykorzystaniem mikroskopu, średnic kropeł przylegających do płytki. Aby wyznaczyć rozkład średnic kropeł w zależności od odległości od centrum wybuchu oraz czasu, który upłynął od momentu wybuchu niezbędnym okazało się zaprojektowanie i wykonanie rejestratora kropeł wody, który charakteryzuje się dużą odpornością mechaniczną (duże zmiany ciśnienia i np. drobiny piasku) oraz możliwością ustawiania momentu rozpoczęcia rejestracji oraz czasu jej trwania. Dodatkowo rejestrator musi być urządzeniem o umiarkowanej masie (mniejszej od 5 kg) tak, aby zminimalizować problem związany z jego umieszczeniem na dużej wysokości (9 m).

Głównym elementem rejestratora kropeł wody jest migawka, która otwiera się po czasie określonym przez użytkownika na określony czas i w sposób również określony przez użytkownika. Pracą migawki zarządza sterownik rejestratora kropeł wody. Sterownik posiada interfejs użytkownika, który pozwala na modyfikację ustawień czasów i trybu pracy migawki. Wymiary zewnętrzne rejestratora zostały dobrane tak, aby pomieścił on szkiełko nakładkowe mikroskopu (22 mm na 22 mm), na którym w czasie określonym przez sterownik rejestrowane są krople wody.

W metodzie tej zastosowano dwa rodzaje płytek szklanych, na których były rejestrowane krople (czyste płytki szklane oraz płytki szklane pokryte sadzą). Pomimo, że czyste płytki szklane pozwalały uzyskać zawsze te same warunki przylegania ich stosowanie było kłopotliwe gdyż w procesie parowania kropeł wody obraz (krople) szybko znikał. Zastosowanie płytek szklanych pokrytych sadzą wyeliminowało zmianę obrazu kropeł w czasie. Krople zostawiały trwałe ślady, który jednak był zależny od ilości osadzonej sadzy. Okazało się więc niezbędne opracowanie powtarzalnego procesu nanoszenia sadzy na płytkę.

Proces wyznaczania rozkładu wielkości kropeł jest następujący. Po wyzwoleniu (przewody umieszczone w ładunku wybuchowym zostają zwarte) sterownik rejestratora

odlicza czas, po którym otwiera migawkę. Aerosol wodny wytworzony w procesie wybuchu zostaje nanoszony na szkiełko nakładkowe mikroskopu przez cały czas, kiedy migawka pozostaje otwarta. Po czasie określonym przez użytkownika migawka zostaje zamknięta w celu zakończenia rejestracji kropeł wody (szkiełko nie może zostać *zalane* – musi istnieć możliwość rozróżnienia poszczególnych kropeł wody). Po około 10 sekundach od wybuchu szkiełko nakładkowe zostaje wyjęte z rejestratora kropeł i następnie zeskanowane do pliku komputerowego (JPEG) przy użyciu mikroskopu badawczego oraz kamery CCD. Wykorzystując ogólnie dostępne programy do obróbki zdjęć zarejestrowane krople zostają zwymiarowane i poddane obróbce statystycznej.

W metodzie tej zostało wykorzystane następujące oprzyrządowanie:

1. mikroskop badawczy RESEARCH P TV - (Pro-Optyka),
2. kamera CCD Bresser Mikro Ocular 3.0MP - (Pro-Optyka),
3. rejestrator kropeł wody wraz ze sterownikiem - (wykonanie OBRUSN w Toruniu).

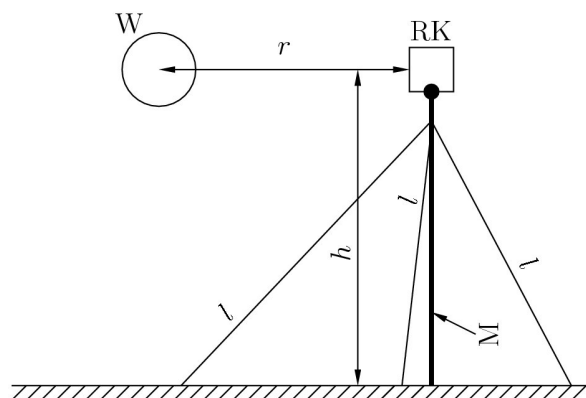
AD 1. Mikroskop pozwala uzyskiwać powiększenia w zakresie od 40 do 1000, posiada stolik mechaniczny z precyzyjnym mechanizmem przesuwu o wymiarach 160 mm na 140 mm oraz precyzyjną podziałkę 2 μ m.

AD 2. Kamera CCD wyposażona jest w matrycę o rozdzielczości 3M piksele (maksymalna rozdzielczość 2048x1536), szybki interfejs USB 2.0. Kamera posiada optykę powiększającą obraz 10 krotnie. Do kamery zostało dostarczone oprogramowanie, które umożliwia rejestrację zdjęć i filmów w najwyższej rozdzielczości.

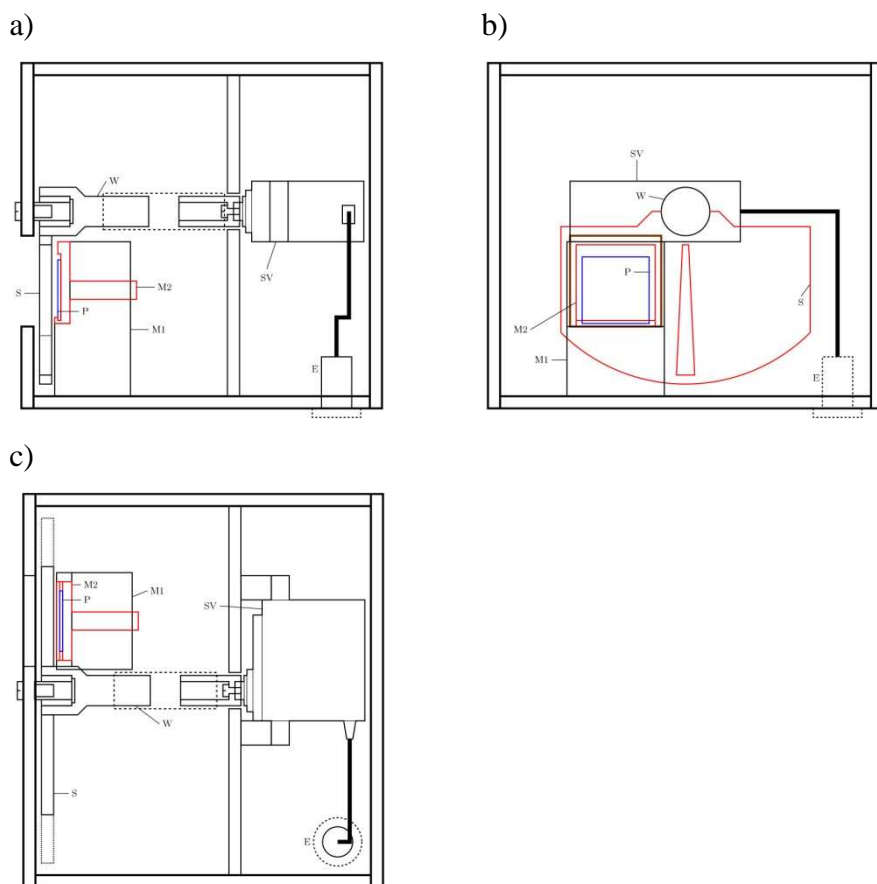
Kamera CCD oraz mikroskop z obiektywem o najmniejszym powiększeniu równym 4 pozwala rejestrować obraz o wymiarach 3 mm w poziomie na 2.25 mm w pionie. Rozdzielczość rejestrowanego obrazu wynosi 2048 pikseli na 1536 pikseli (odpowiednio w poziomie i pionie). Stosunek liczby pikseli do wymiaru w obu kierunkach jest taki sam i wynosi (w przypadku obiektywu o powiększeniu równym 4) $w_4 = 682.6(6)$ pikseli na 1 mm. Rzeczywista średnica kropli przylegającej może być zatem obliczona, w tym przypadku, jako iloczyn w_4 i liczby pikseli, które kropla zajmuje. Współczynniki w_{10} oraz w_{40} dla dwóch pozostałych obiektywów są odpowiednio 2.5 oraz 10 razy większe od w_4 .

AD 3. Rysunek 6.5.2.1 przedstawia sposób umieszczenia rejestratora kropeł wody podczas wykonywania pomiaru. Odległość r może zostać zmieniona tak, aby

można było dokonać rozkładu przestrzennego średnic kropel wody. Wysokość umieszczenia rejestratora h , powinna być taka sama jak wysokość umieszczenia kapsuły wodnej W .



Rysunek 6.5.2.1. Umieszczenie rejestratora kropel podczas pomiaru (W – kapsuła wodna, RK – rejestrator kropel, l – linka naciągowa, M – maszt o regulowanej wysokości)



Rysunek 6.5.2.2. Rejestrator kropel (P – szklana płytką – szkiełko nakładkowe mikroskopu (22 mm na 22 mm na 250 μm), S – migawka, SV – serwomechanizm, E – złącze sygnałów elektrycznych, M1 – nieruchoma część elementu mocującego szklaną płytkę, M2 – część ruchoma elementu mocującego szklaną płytkę, W – wał przenoszący napęd z serwomechanizmu na migawkę): a) widok z boku, b) widok z przodu, c) widok z góry

Rejestrator kropel posiada możliwość pracy w dwóch trybach. Tryb zerowy (normalny) pracy rejestratora polega na przesunięciu migawki S (Rysunek 6.5.2.2) tak, aby odsłonić całkowicie szkiełko nakładkowe P i umożliwić naniesienie na nie kropel aerozolu. W tym trybie można ustawić czas t_0 , po którym (od momentu wybuchu) ma rozpocząć się odsłanianie oraz czas przez, który migawka zostaje otwarta t_d .

Załącznik nr 4 pracy poświęcony jest tematyce wyznaczenia parametrów pracy rejestratora kropel.

W trybie pierwszym (szczelinowym) podczas rejestracji przesuwana jest szczelina migawki S (Rysunek 6.5.2.2 b) nad płytką szklaną P. Szerokość szczeliny została dobrana tak, aby czas rejestracji dla dowolnego punktu na płytce był taki sam i

wynosił 10 ms. Dzięki takiemu rozwiązaniu możliwe stało się rejestrowanie pojedynczych kropeł przy bardzo intensywnych strumieniach kropeł wody. Podobnie jak w trybie zerowym istnieje tutaj możliwość ustawiania czasu t_0 .

Elementy M1 oraz M2 służą do mocowania szkiełka nakładkowego mikroskopu P w rejestratorze. Element M1 jest nieruchomy i posiada mechanizm mocujący ruchomy element M2. Element M2 po dokonanej rejestracji wyjmowany jest wraz ze szkiełkiem nakładkowym z rejestratora. Został on wyposażony w zawiasy, które pozwalają na szybkie wysunięcie szkiełka nakładkowego P i umieszczeniu go pod obiektywem mikroskopu.

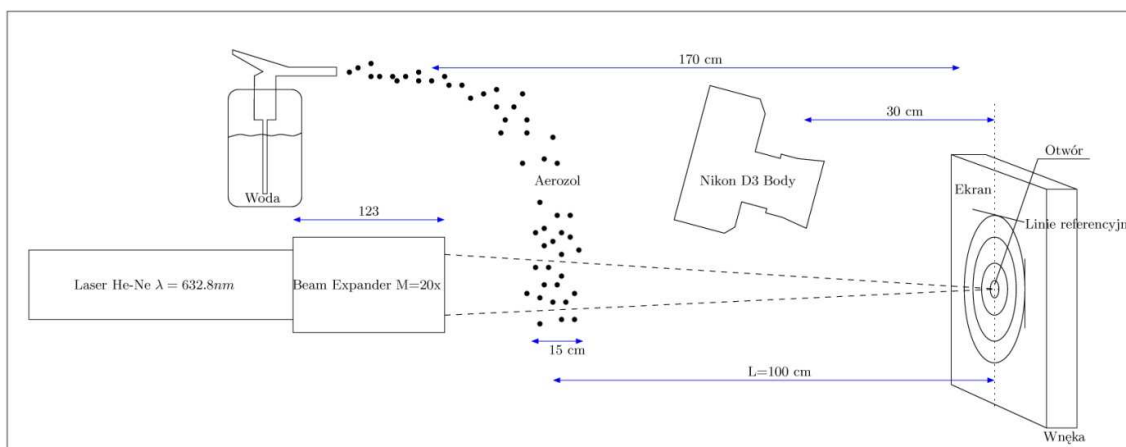
Ze względu na specyfikę wytwarzania aerozolu wodnego (przez wybuch) uchwycenie kropeł jest zadaniem trudnym. Dlatego bezpośredni pomiar rozkładu średnic kropeł zarejestrowanych na płytce szklanej jest metodą obciążoną pewnym błędem systematycznym, związanym z powłoką naniesioną na powierzchnię płytki. Dodatkowo, istnieją też błędy przypadkowe, związane np. ze zlewaniem się dwu kropli na powierzchni płytki. Z tego powodu podjęto próbę wykorzystania optycznych metod polegających na badaniu natężenia światła rozproszonego przez aerozol. Po wytworzeniu aerozolu o stabilnych parametrach opisana niżej metoda została zastosowana do wyznaczenia kąta przylegania kropli do płytki szklanej, co pozwoliło wykalibrować metodę wykorzystaną w pomiarze wielkości kropeł.

Wyznaczenie promieni kropeł aerozolu przy użyciu płytki i mikroskopu wymaga kalibracji ze względu na nieznaną kąt przylegania kropeł do podłoża. W tym celu wykonano pomiar średnic aerozolu poprzez badanie światła rozproszonego w przód. Następnie aerozol naniesiono na szklaną płytkę i zmierzono średnicę powstających obrazów przy użyciu mikroskopu.

W celu wyznaczenia średnic kropeł aerozolu wykorzystano metodę pomiarową bazującą na analizie promieniowania elektromagnetycznego rozproszonego przez aerozol. Rozpraszanie światła przez krople aerozolu zależy między innymi od średnicy kropeł d , współczynnika załamania światła m , długości fali promieniowania wzbudzającego λ .

Jako źródła wzbudzającego użyto monochromatycznego światła laserowego wytwarzanego przez laser helowo-neonowy o mocy 15 mW. Wiązka światła laserowego zostaje rozszerzona przy użyciu rozszerzacza wiązki (Beam Expandera) aby zapewnić właściwy obszar oddziaływania światła z chmurą aerozolu. Wykorzystano światło monochromatyczne z powodu łatwiejszej interpretacji obrazów.

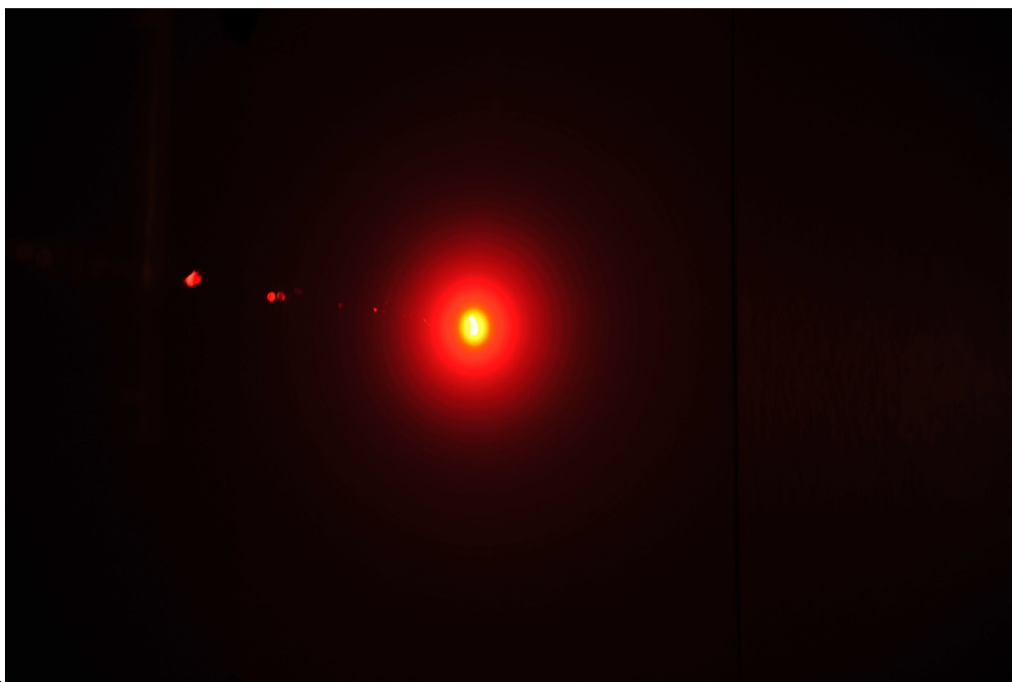
6. ANALIZA WYNIKÓW



Rysunek 6.5.2.3. Schemat eksperymentu

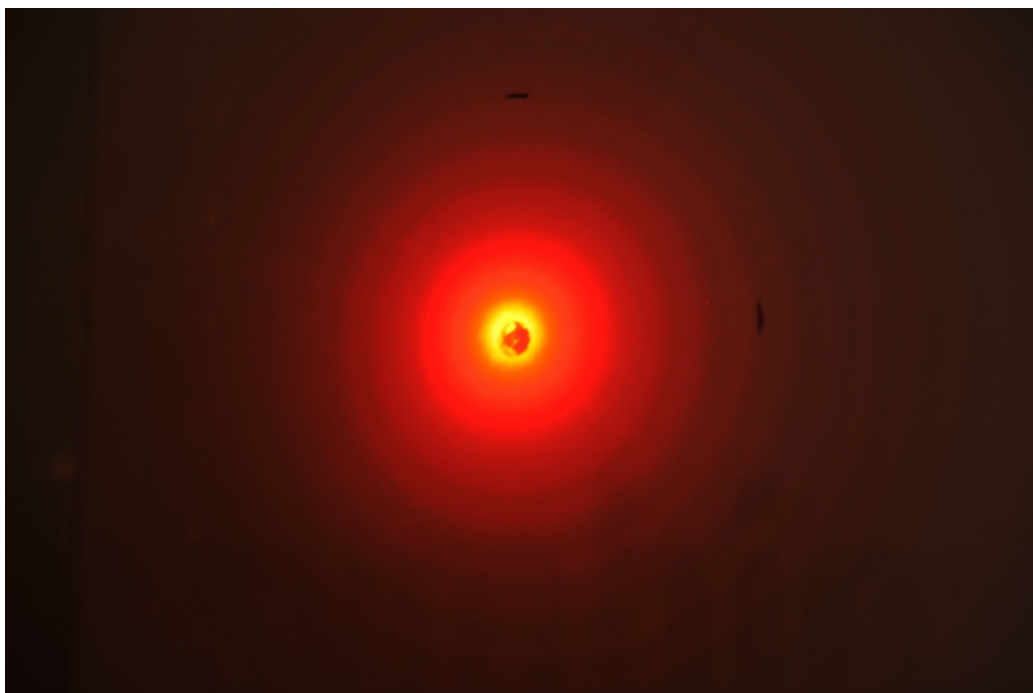
Przebieg eksperymentu przedstawiono na Rysunku 6.5.2.3. Światło laserowe po odpowiednim uformowaniu przez „Beam Expandera” rozszerzającym wiązkę 20-krotnie było rozpraszane przez chmurę aerozolu wytwarzanego przez spryskiwacz. W odległości $L=1$ metra od chmury aerozolu zamontowany był ekran wykonany z białej kartki papieru. Wiązka promieniowania laserowego zogniskowana została w odległości na której znajdował się ekran. W celu wytłumienia bardzo silnej wiązki głównej w ekranie wykonano otwór a za ekranem zbudowano wnękę, w której wiązka została wielokrotnie odbita i rozproszona. Uzyskany obraz dyfrakcyjny na ekranie był następnie fotografowany aparatem Nikon Body D3 umieszczonym w odległości około 30 cm od ekranu pod kątem 30 stopni do wiązki światła. Ze względu na dynamiczne obrazy zdjęcia wykonywano w trybie multishot. Wszystkie odległości zostały zoptymalizowane dla uzyskania obrazów o najlepszym kontraście. Na ekranie naniesiono linie referencyjne w celu wyznaczenia kąta rozproszenia α .

Na poniższych rysunkach przedstawiono wybrane zdjęcia obrazów dyfrakcyjnych. Rysunek 6.5.2.4 przedstawia obraz rozproszony w przód zarejestrowany na ekranie aparatem fotograficznym. Duże natężenie wiązki głównej powodowało nasycenie matrycy CMOS. Zdjęcie wykonano w ciemności.



Rysunek 6.5.2.4. Zdjęcie z niewytlumioną wiązką główną

Rysunek 6.5.2.5 przedstawia zdjęcie obrazów dyfrakcyjno- interferencyjnych po wytlumieniu wiązki głównej. Wiązka główna została wytlumiona poprzez wykonanie otworu w ekranie przez który wpadała do wnęki gdzie następowało jej wielokrotne odbicie. Pozwoliło to wykonywać zdjęcie z większą czułością i w konsekwencji lepiej widoczne są prążki interferencyjne kolejnych rzędów.



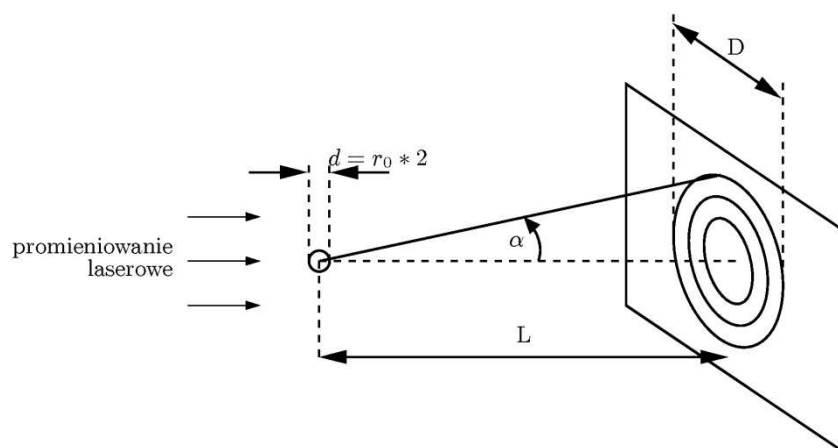
Rysunek 6.5.2.5. Zdjęcie z wytlumioną wiązką główną

6.5.2.1 Analiza przy pomocy teorii dyfrakcyjnej Fraunhofera

Do analizy natężenia światła rozproszonego przez sferyczne krople aerozolu można w pierwszym przybliżeniu zastosować teorię dyfrakcyjną Fraunhofera [9-14], która może być stosowana w przypadku gdy:

- cząstka rozpraszająca światło jest całkowicie nieprzezroczysta,
- cząstka rozpraszająca ma wymiar znacznie większy od długości fali światła.

Przy takim podejściu wypadkowe natężenie fali zależne jest od promieni kropli $r_0 = d/2$ i od kąta α pod którym analizowany punkt na ekranie widziany jest ze środka kropli. Rysunek 6.5.2.1.1 przedstawia dyfrakcję na przeszkodzie o średnicy d . W odległości L znajduje się ekran na którym widoczny jest obraz dyfrakcyjno-interferencyjny.



Rysunek 6.5.2.1.1. Dyfrakcja Fraunhofera

Wzór opisujący natężenie światła rozproszonego powstającego na ekranie wyraża się następująco:

$$I = I_0 \left(\frac{2J_1(kr_0 \sin \alpha)}{kr_0 \sin \alpha} \right)^2 \quad (6.5.2.1.1)$$

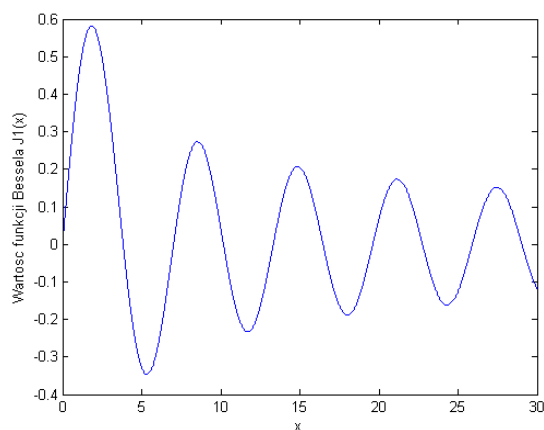
gdzie J_1 – to funkcja Bessela pierwszego rzędu,

k - liczba falowa $k = \frac{2\pi}{\lambda}$,

λ - długość fali promieniowania laserowego.

6. ANALIZA WYNIKÓW

Rysunek 6.5.2.1.2 przedstawia przebieg funkcji $J_1(x)$. Występujące w obrazie dyfrakcyjno-interferencyjnym minimalne natężenia występują gdy funkcja $J_1(x)$ przyjmuje wartości zerowe.



Rysunek 6.5.2.1.2. Przebieg funkcja Bessela pierwszego rzędu

Kolejne pierwiastki funkcji $J_1(x)=0$ pokazuje poniższa tabela.

Tabela 6.5.2.1.1. Pierwiastki funkcji Bessela

k	Pierwiastki funkcji $J_1(x)$ p_k
1	3,83
2	7,015
3	10,17
4	13,32
5	16,47
6	19,61
7	22,76
8	25,90
9	29,04

Wartości kątów α dla których występują kolejne ciemne pierścienie w obrazie dyfrakcyjnym opisane są wyrażeniem:

$$\alpha_k = \frac{p_k \lambda}{\pi d} \quad (\text{rad}), \quad (6.5.2.1.2)$$

p_k – k -ty pierwiastek funkcji Bessela pierwszego rzędu,

λ – długość fali promieniowania wzbudzającego (632,8 nm),

d – średnica kropli aerozolu.

Aby uzyskać α wyrażone w stopniach należy pomnożyć przez czynnik $360^\circ/2\pi$.

Ostatecznie aby wyznaczyć średnice kropli d należy dla każdego minimum wyznaczyć:

$$d = \frac{p_k \lambda \cdot 180}{\pi \alpha_k \cdot \pi}. \quad (6.5.2.1.3)$$

gdzie p_k - pierwiastek funkcji Bessela zgodnie z tabelą 6.5.2.1.1, λ -długość fali lasera helowo-neonowego wyrażona w metrach, α_k - kąt pod którym występuje k -te minimum wyrażone w stopniach. Kąt α_k można wyznaczyć mierząc odległość L i odległość między środkiem obrazu a k -tym minimum.

W celu wyznaczenia średnic d kropli aerozolu wyznaczono odległość między środkiem okręgów interferencyjnych a kolejnymi minimami wyrażoną w pikselach. Następnie określono odległość między środkiem a linią referencyjną w pikselach. Po unormowaniu wyznaczono kąty α_k kolejnych minimów. Dla każdego minimum policzono średnicę. Szczegóły obliczeń dla wybranego zdjęcia pokazano w poniższej tabeli.

Tabela 6.5.2.1.3. Przykładowa seria wyników uzyskanych dla jednego ze zdjęć

Nr min.	Pierwiastek	min. [piksele]	min. [mm]	kąt [stopnie]	Średnica [μm]
1	3,83	226	15,7	0,90	49,0
2	7,01	335	23,3	1,33	60,5
3	10,17	462	32,1	1,84	63,7
4	13,32	548	38,1	2,18	70,3
5	16,47				

W wyniku średnica d kropli wytwarzanego aerozolu po zastosowaniu teorii dyfrakcyjnej Fraunhofera wynosi $d = (64 \pm 10) \mu\text{m}$.

6.5.2.2 Wykorzystanie do analizy teorii Lorenz-Mie

Teoria dyfrakcyjna Fraunhofera jest opisem bardzo przybliżonym. Zakłada istnienie pojedynczej przeszkody o kształcie koła. Opis ten nie w pełni tłumaczy kształt powstających obrazów oraz nie pozwala określić rozkładu średnic kropeł aerozolu znajdującego się w polu promieniowania. Dokładniej zjawisko rozpraszania płaskiej fali elektromagnetycznej na obiekcie w kształcie kulki opisał w swojej pracy Gustaw Mie [71]. W późniejszym czasie teoria została zredukowana i przeformułowana przez Borna [72], Strattona [73], Bohrena [74].

Teoria Mie znacznie lepiej opisuje uzyskane obrazy. W celu wyznaczenia rozkładu średnic należy rozwiązać problem odwrotny. W tym celu konieczne jest wyłuskanie ze zdjęcia zależności natężenia I od kąta rozproszenia α . Następnie do wyznaczonych punktów dopasować numerycznie krzywą. Ze względu na wykonanie zdjęcia pod kątem różnym od prostego w stosunku do ekranu, należy dokonać transformacji perspektywicznej uzyskanego obrazu. Poniższy rysunek przedstawia przykładowy obraz po przekonwertowaniu do odcieni szarości. Zamiast okręgów widoczne są elipsy. Macierz konwersji można wyznaczyć w kolejnych iteracjach stosując jako kryterium kształt prążków interferencyjnych zbliżony do okręgu.

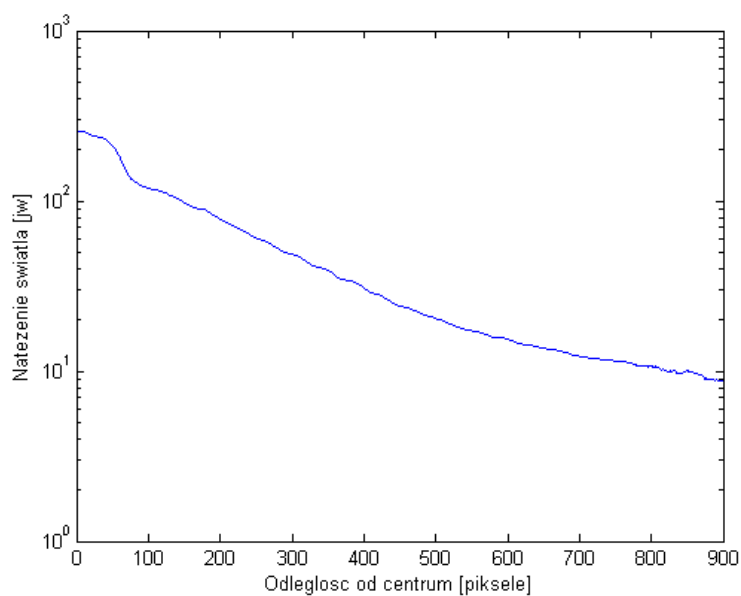


Rysunek 6.5.2.2.1. Zdjęcie ze zniekształceniami perspektywicznymi



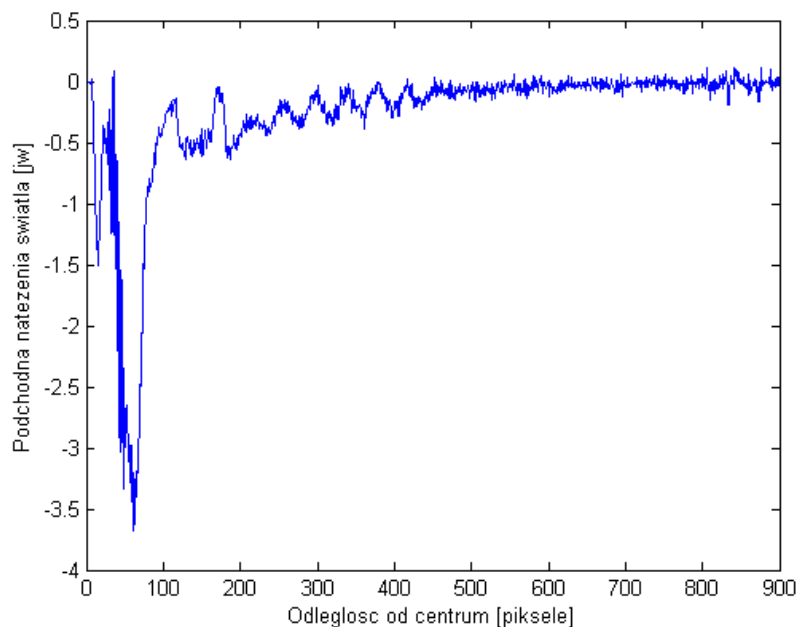
Rysunek 6.5.2.2.2. Zdjęcie po usunięciu zniekształceń perspektywicznych

W kolejnym etapie należy precyzyjnie wyznaczyć współrzędne środka prążków interferencyjnych. Dla zweryfikowania poprawności wyznaczenia umieszczono okrąg którego środek znajduje się w wyznaczonym punkcie. Następnie sumuje się wszystkie piksele odległe od środka o wartość r , gdzie r zmienia się np. od 1 do 900 pikseli.



Rysunek 6.5.2.2.2. Wyznaczone natężenie światła rozproszonego w funkcji odległości od centrum

Otrzymany przebieg natężenia przedstawiono na Rysunku 6.5.2.2.2. Wartości maksimum i minimum są słabo widoczne. Do takiego przebiegu nie jest możliwe dopasowanie krzywej wynikającej z teorii Lorenz-Mie. Zmiany natężenia znacznie bardziej uwidaczniają się na pochodnej natężenia światła rozproszonego.



Rysunek 6.5.2.2.3. Pochodna natężenia światła rozproszonego dla danych z Rysunku 6.5.2.2.2

Teoretycznie wyniki uzyskane na podstawie teorii Lorenz-Mie powinny być dokładniejsze niż w przypadku zastosowania teorii Fraunhofera. W praktyce, jak wykazano w pracy [14], w ramach stosowalności modelu Fraunhofera, metoda ta może charakteryzować się lepszą dokładnością w odniesieniu do modelu Lorenz-Mie.

6.5.2.3 Korekcja rozkładów średnic kropeł wody wyznaczanych metodą mikroskopową

W celu dokonania korekcji rozkładów średnic kropeł wody wyznaczonych metodą mikroskopową wykonano naniesienia wzorcowej próbki kropeł wody, której parametry zostały wyznaczone stosując metodę rozpraszania w przód, na płytce szklanej. Porównanie wyniku otrzymanego z metody rozpraszania oraz wyników otrzymanych z obserwacji mikroskopowych pozwoliło oszacować czynniki skalujące rozkład. Skalowania dokonano dla kropeł rejestrowanych na płytkach szklanych pokrytych sadzą oraz płytek czystych na podstawie dopasowanych rozkładów normalnych (na podstawie metody najmniejszych kwadratów) [75]. Skalowaniu w tym przypadku podlegały wartości średnie średnic kropeł wody.

Wielkości kropeł dla próby wzorcowej uzyskane z wykorzystaniem metody rozpraszania w przód wynoszą $64 \mu\text{m} \pm 10 \mu\text{m}$. W przypadku czystej płytki szklanej wielkości kropeł wynosiły $400 \mu\text{m} \pm 115 \mu\text{m}$. Czynnikiem skalujący wartość średnią dla tego przypadku wyniósł $s_{1a}=6.25$. Dla płytki pokrytej sadzą wielkości kropeł wynosiły $165 \mu\text{m} \pm 41 \mu\text{m}$, a czynnik skalujący wartość średnią był równy $s_{2a}=2.58$.

6.5.2.4 Wyniki pomiaru wielkości kropeł aerozolu

Rejestrator kropeł został ustawiony w odległości 10 m od centrum wybuchu na wysokości, na której znajdowała się kapsuła wodna. Wysokość ta wynosiła 2 m nad poziomem gruntu. Tak niskie usytuowanie pozwoliło na bezproblemową obsługę rejestratora kropeł, który wymagał przed i po każdym doświadczeniu przenoszenia płytki szklanej. Pokrycie sadzą płytek pozwoliło na trwałe zachowanie śladów wszystkich „przechwyconych” kropeł. Wykonanie fotografii płytek (za pośrednictwem mikroskopu sprzężonego z aparatem cyfrowym) dawało w rezultacie możliwość pomiaru średnicy kropeł.

W wyniku opadnięcia kropli na płytkę rejestratora zmienia się jej kształt [59, 76]. Na podstawie teorii Fraunhofera, dotyczącej analizy natężenia światła rozproszonego przez krople sferyczne, możliwe jest ustalenie współczynnika skalującego. Kropla o średnicy w powietrzu (64 ± 10) μm po opadnięciu na płytkę szklaną pokrytą sadzą pozostawia

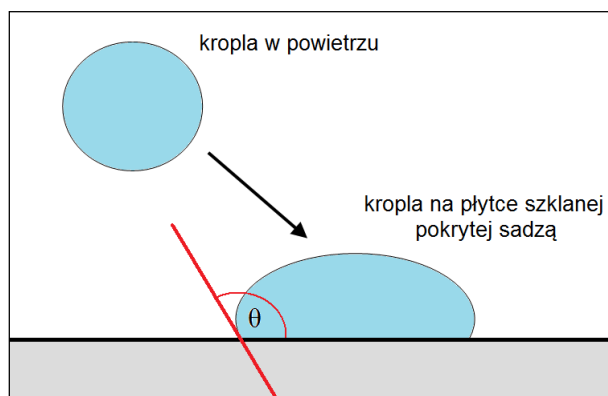
na niej ślad o średnicy (165 +/- 41) μm. Przyjęto, że wielkość śladu pozostawionego na płytce – średnicę kropli (d_1) należy przemnożyć przez $64/165 = 0,3879$ aby otrzymać średnicę kropli w powietrzu (d_0). Tego typu podejście jest oczywistym uproszczeniem, ponieważ średnica kropli na płytce szklanej (d_1) jest funkcją wielu parametrów, wśród których jest wielkość kropli (d_0), prędkość (v) z jaką kropla uderza o płytkę czy wpływ pionowego ułożenia płytki rejestrującej:

$$d_1 = f(d_0, v, \dots) \quad (6.5.2.4.1)$$

Wyznaczenie prędkości uderzenia każdej kropli o płytkę jest zadaniem praktycznie niewykonalnym. Ze względu na brak możliwości ustalenia dokładnej zależności między d_0 i d_1 (które mogło by być tematem samodzielnej publikacji ze względu na złożoność zjawiska), w niniejszym opracowaniu, przyjęto stałą wartość współczynnika skalującego. To niewielkie uproszczenie nie wypacza w żaden sposób otrzymanych tu wyników, które mogą różnić się od właściwych o maksymalnie kilka procent. W kontekście skuteczności gaśniczej aerozolu wodnego tak niewielka zmiana wartości średnicy kropeł nie ma w praktyce żadnego znaczenia.

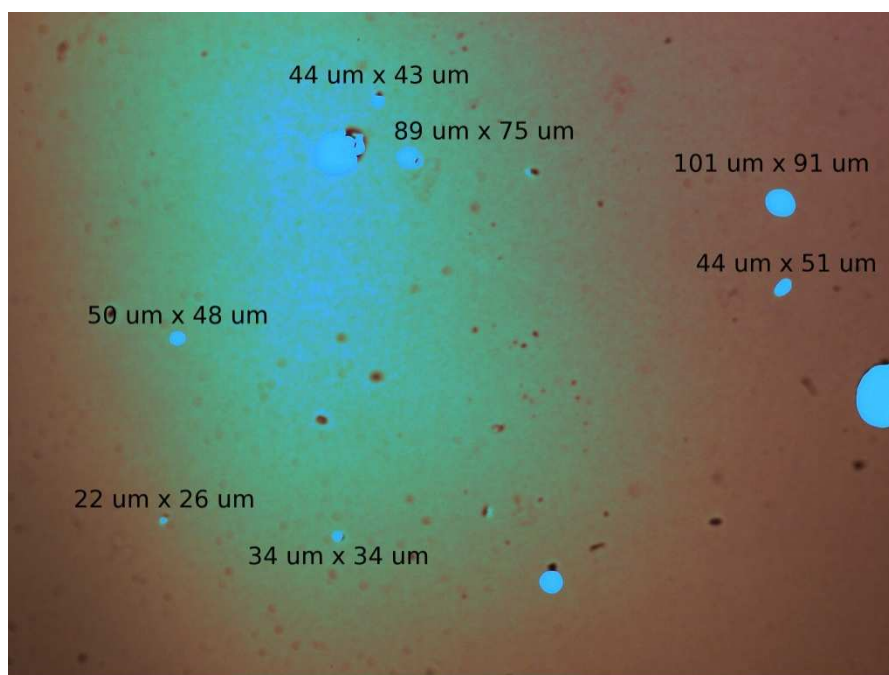
Ślady kropeł, które widoczne były na płytce szklanej pokrytej sadzą, miały mniej więcej dwa rodzaje kształtów. Są nimi koło oraz elipsa. W przypadku gdy rejestrowane były elipsy przyjmowaliśmy, że ślad jest okręgiem, którego średnica to średnia arytmetyczną osi wielkiej i małej elipsy. Przykładowe zdjęcia płytek szklanych pokrytych kroplami aerozolu wodnego przedstawione są na Rysunku 6.5.2.4.2 i 6.5.2.4.3. Procedura postępowania ze śladami o kształcie elipsy pokazana jest na Rysunku 6.5.2.4.4.

6. ANALIZA WYNIKÓW

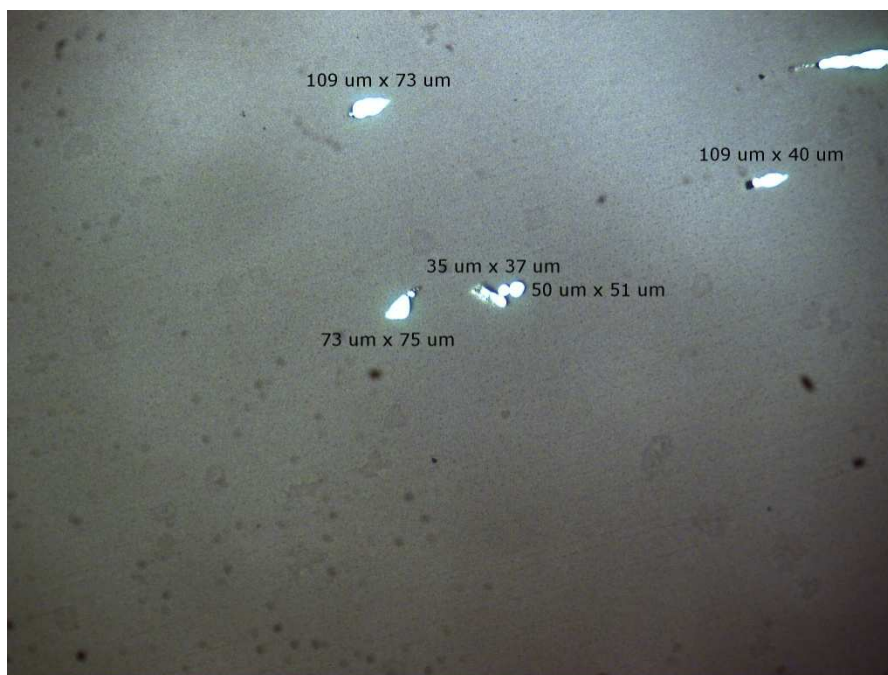


Rysunek 6.5.2.4.1. Kropla aerozolu po opadnięciu na płytkę szklaną przyjmuje kształt, który można scharakteryzować kątem przylegania θ wynoszącym około 110° dla sadzy.

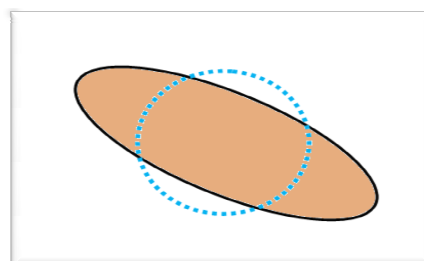
Zmiana geometrii kropli jest czynnikiem komplikującym dokładne wyznaczenie wielkości kropli aerozolu w powietrzu



Rysunek 6.5.2.4.2. Przykładowe zdjęcie przedstawiająca płytkę szklaną rejestratora z widocznymi śladami kropli aerozolu



Rysunek 6.5.2.4.3. Przykładowe zdjęcie przedstawiające płytkę szklaną rejestratora z widocznymi śladami kropeł aerozolu. Kształt zarejestrowane tutaj nie są okręgami, można je raczej porównać do elips



Rysunek 6.5.2.4.4. Ślady niektórych kropeł na płytce szklanej rejestratora mają kształt zbliżony do elipsy (obszar z obrysem linią ciągłą). W celu wyznaczenia wielkości kropli aerozolu w powietrzu przyjmowaliśmy, że ślad jest okręgiem, którego średnica to średnia arytmetyczną osi wielkiej i małej elipsy (obszar wyznaczony przez linię przerywaną)

Widok stanowiska doświadczalnego, do pomiaru wielkości kropeł aerozolu wodnego, przedstawiony jest na Rysunku 6.5.2.4.5. Widoczny tu jest, po lewej stronie worka, rejestrator. Na Rysunkach 6.5.2.4.6 i 6.5.2.4.7 przedstawione są dwie klatki filmu z przykładowym procesem fragmentacji wody zgromadzonej w kapsule. Ekspansja

6. ANALIZA WYNIKÓW

aerozolu przebiega z relatywnie dużą prędkością i powstała ilość kropeł również jest znacząca. Te dwa fakty były kluczowymi wytycznymi na etapie konstruowania rejestratora kropeł. Odpowiednie wykonanie migawki pozwoliło na zapobiegnięcie zalania płytki przez przemieszczający się strumień aerozolu. W wyniku przeprowadzonych analiz teoretycznych oraz na podstawie prób wstępnych przyjęto, że płytka rejestratora powinna być wystawiona w czasie od 600 ms do 900 ms na działanie aerozolu. Stochastyczność procesu aerozolowania wybuchowego wymagała dobierania ustawień parametrów rejestratora dla każdej próby indywidualnie. Nawet w obrębie tego samego cyklu badań (ta sama wielkość kapsuły i wielkość materiału wybuchowego) spotykaliśmy znaczące zróżnicowanie w ekspansji aerozolu.



Rysunek 6.5.2.4.5. Widok stanowiska doświadczalnego. W środku kadru widoczna jest kapsuła wodna przygotowana do detonacji, po lewej stronie worka widoczny jest rejestrator kropeł (w odległości 10 m od centrum wybuchu)



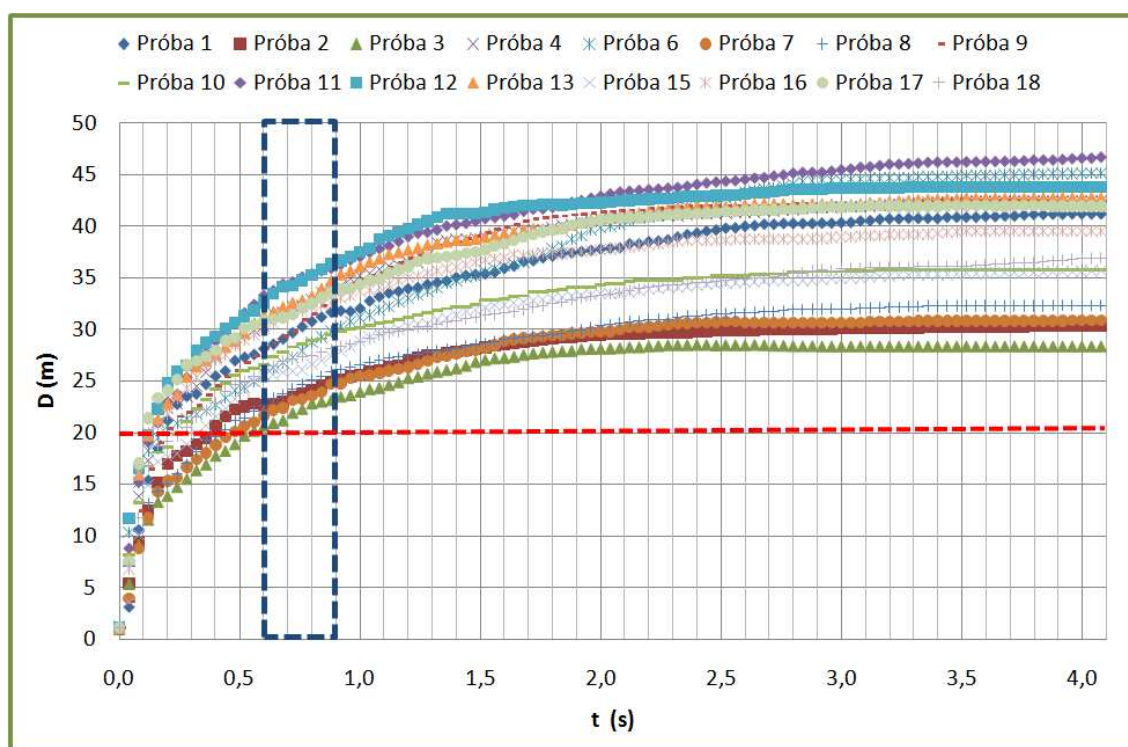
Rysunek 6.5.2.4.6. Formowanie się chmury aerozolu wodnego. Widoczny po lewej stronie rejestrator nie został jeszcze objęty działaniem aerozolu



Rysunek 6.5.2.4.7. Kilkadziesiąt milisekund po detonacji materiału wybuchowego zgromadzonego w kapsule rejestrator kropel zostaje „objęty” zasięgiem działania aerozolu. Duża ilość aerozolu wpadającego na rejestrator była przyczyną komplikującą pomiar wielkości kropeł (należało właściwie dobrać odpowiednie parametry rejestratora aby płytka szklana nie została zalana wodą)

6. ANALIZA WYNIKÓW

Na Rysunku 6.5.2.4.8 przedstawione są procesy (średnica chmury w funkcji czasu) rozprzestrzeniania się chmury dla wszystkich wykonanych doświadczeń. Wykres ten zawiera zależność średnicy chmury od czasu ekspansji. Linią czerwoną zaznaczone jest usytuowanie rejestratora względem centrum wybuchu (10 m od środka). Linią niebieską z obrazowano przedział czasu, dla którego rejestrator „przechwytywał” krople. Taka konfiguracja pozycji i czasu pozwoliła na wykonanie cyklu badań z powodzeniem. Rysunek 6.5.2.4.8 pozwala zorientować się nad zróżnicowaniem przeprowadzonych doświadczeń. Dodatkowo należy zaznaczyć tu, iż na etapie prowadzonych prób zależności przedstawione na Rysunku 6.5.2.4.8 nie były znane, co znacznie komplikowało wykonanie badań.



Rysunek 6.5.2.4.8. Średnica chmury aerozolu wodnego w funkcji czasu rozprzestrzeniania. Przerywana linia niebieska obrazuje przedział czasu od 600 ms do 900 ms, w którym rejestrator „przechwytywał” krople. Linia czerwona przedstawia odległość liczoną od centrum wybuchu, na której rejestrator był ustawiony. Na podstawie analizy tego typu wykresów możliwe było skonfigurowanie parametrów pracy rejestratora

Pomiaru wielkości kropeł aerozolu wodnego, powstałego w wyniku detonacji ładunku wybuchowego, dotychczas nikt nie wykonał dla tej ilości wody, która jest przedmiotem tej pracy (dokonywano pomiarów dla ilości wody o około trzy rzędy wielkości mniejszej [4, 31]). Do czasu wykonania naszych doświadczeń nie można było stwierdzić nic na temat ewentualnej różnorodności powstałych kropeł. Metoda opadania (opisana w poprzednim rozdziale) wskazywała na występowanie zbliżonej wielkości kropeł, ale zakres stosowności tej metody dotyczył chwili, dla której chmura aerozolu opada ruchem jednostajnym (około 5 sekund od chwili detonacji). Metoda ta pozwalała na pomiar wielkości pewnej frakcji kropeł i dla każdej próby tej samej. Analiza opadania zawsze dotyczyła górnego obrysu chmury aerozolu wodnego. Metoda „przechwytywania” pozwoliła na zbadanie środka obłoku. Ze względu na brak jakichkolwiek danych założono, że rozkład wielkości kropeł może być przybliżony rozkładem danym równaniem [77, 78, 79]

$$n_u(r) = \left(\left(\frac{a_0}{\mu} \right)^{\mu+1} \Gamma(\mu + 1) \right)^{-1} N_0 r^\mu e^{-\frac{\mu}{a_0} r}. \quad (6.5.2.4.2)$$

Rozkład ten posiada niezależne parametry a_0 , N_0 , μ , gdzie r to promień kropli aerozolu wodnego. Analiza uzyskanych wyników została poczyniona w oparciu o powyższy wzór ponieważ jego dopasowanie cechuje się wysokimi współczynnikami korelacji oraz występował on w wielu zagadnieniach dotyczących rozkładu kropeł [77, 78, 79]. Zatem wykorzystanie, podczas analizy danych doświadczalnych, omawianego rozkładu nie ma na celu potwierdzenia jego „słuszności” i interpretacji od strony fizycznej procesu fragmentacji. Służy on do porównania różnych cykli doświadczalnych. Właściwego rozkładu nie jesteśmy w stanie podać m.in. ze względu na małą ilość przeprowadzonych doświadczeń. Wzór (6.5.2.4.2) należy traktować jako dobre przybliżenie właściwego rozkładu.

Rozkład kropeł (6.5.2.4.2) posiada wartość oczekiwaną wynoszącą

$$E(r) = \left(\frac{a_0}{\mu} \right) (\mu + 1), \quad (6.5.2.4.3)$$

natomiast jego odchylenie standardowe to

$$\sigma = \left(\frac{a_0}{\mu}\right) \sqrt{\mu + 1}. \quad (6.5.2.4.4)$$

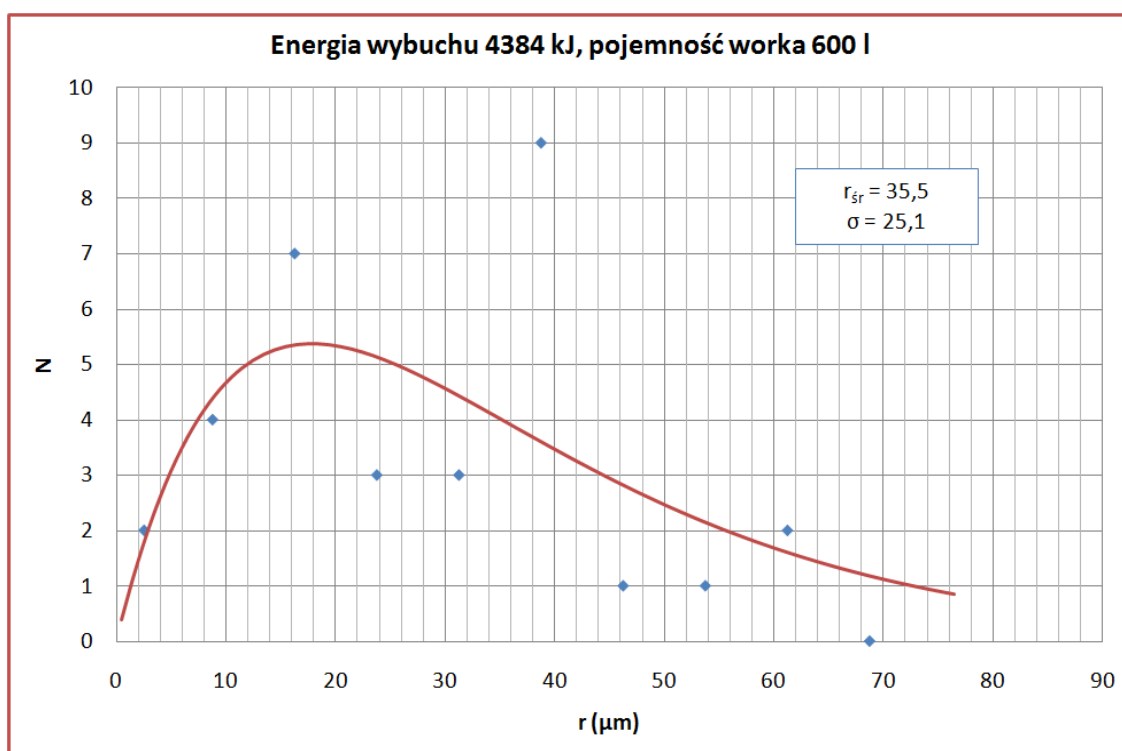
Stosowne parametry rozkładu kropel aerozolu wodnego danego równaniem (6.5.2.4.2) zostały wyznaczone w Załączniku nr 5.

Poniższe podrozdziały tej części pracy zawierają zestawienie wyników uzyskanych promieni kropel aerozolu wodnego dla każdego z pięciu cykli badań. Uzyskane doświadczalnie histogramy posłużyły do wyznaczenia optymalnych rozkładów danych wzorem (6.5.2.4.2) (metodą najmniejszych kwadratów). Wyznaczone zostały parametry rozkładu: wartości oczekiwane (r_{sr}) oraz odchylenia standardowe (σ). Trafność założenia rozkładu wielkości kropel postaci (6.5.2.4.2) można szacować na podstawie współczynnika korelacji (r), który również został obliczony.

6. ANALIZA WYNIKÓW

Pierwszy cykl doświadczeń obejmował trzy próby, w których wykorzystano worki o pojemności 600 l z ładunkiem aerozolującym o energii wybuchu 4384 kJ. W dwóch próbach nie udało się uzyskać wyników (złe ustawienia parametrów rejestratora oraz zawodność pobudzacza materiału wybuchowego).

Histogram uzyskanych średnic kropeł aerozolu wodnego przedstawiony jest na Rysunku 6.5.2.4.9. Do uzyskanych wyników został dopasowany rozkład dany wzorem (6.5.2.4.2) (metodą najmniejszych kwadratów). Uzyskano wartość średnią promienia kropeł (wartość oczekiwaną rozkładu kropeł) $r_{sr} = 35,5 \mu\text{m}$ przy odchyleniu standardowym $\sigma = 25,1 \mu\text{m}$. Współczynnik korelacji wyniósł $r = 0,616$. Podczas analizy uzyskanych wyników należy brać pod uwagę niewielką liczebność kropeł zarejestrowanych w tym cyklu doświadczeń.

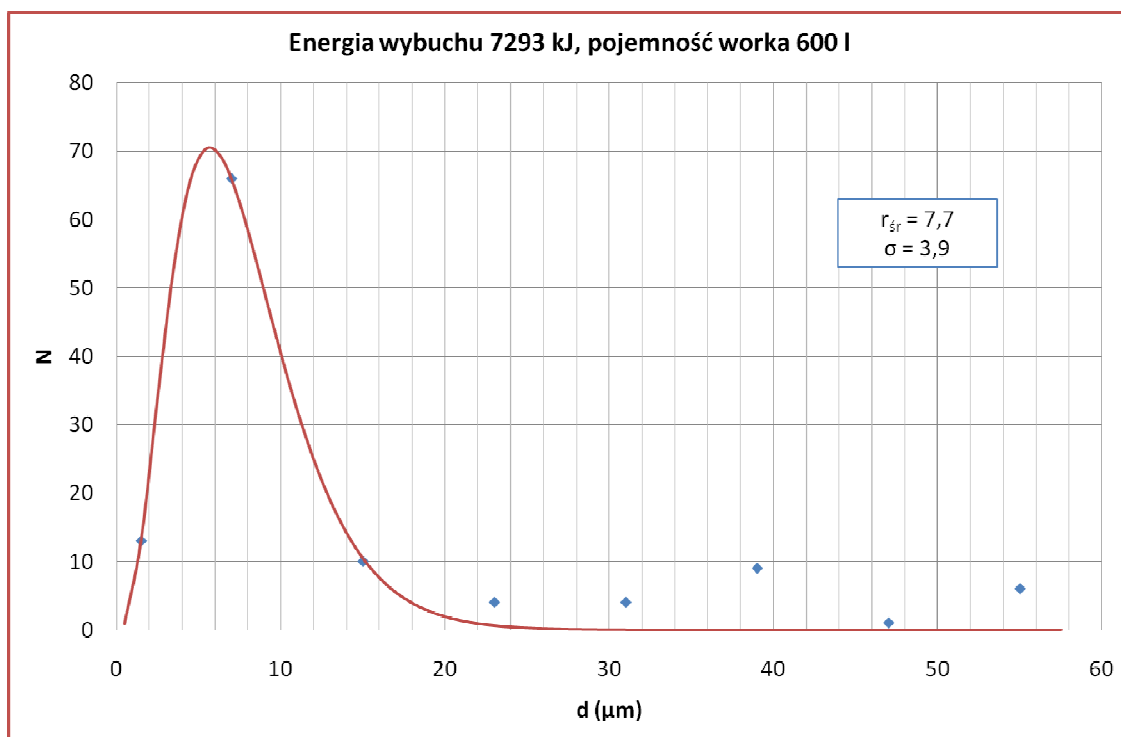


Rysunek 6.5.2.4.9. Histogram obrazujący zróżnicowanie zarejestrowanych średnic kropeł dla próby, w której wykorzystano worki o pojemności 600 l z ładunkiem wybuchowym Emulinitem o energii wybuchu około 4,4 MJ. Wykres zawiera dopasowany rozkład dany równaniem (6.5.2.4.2), którego niektóre parametry przedstawiono w obszarze rysunku (r_{sr} – wartość oczekiwana, σ – odchylenie standardowe)

6. ANALIZA WYNIKÓW

Drugi cykl doświadczeń obejmował trzy próby, w których wykorzystano worki o pojemności 600 l z ładunkiem aerozolującym o energii wybuchu 7293 kJ. We wszystkich próbach rejestrator zebrał dane.

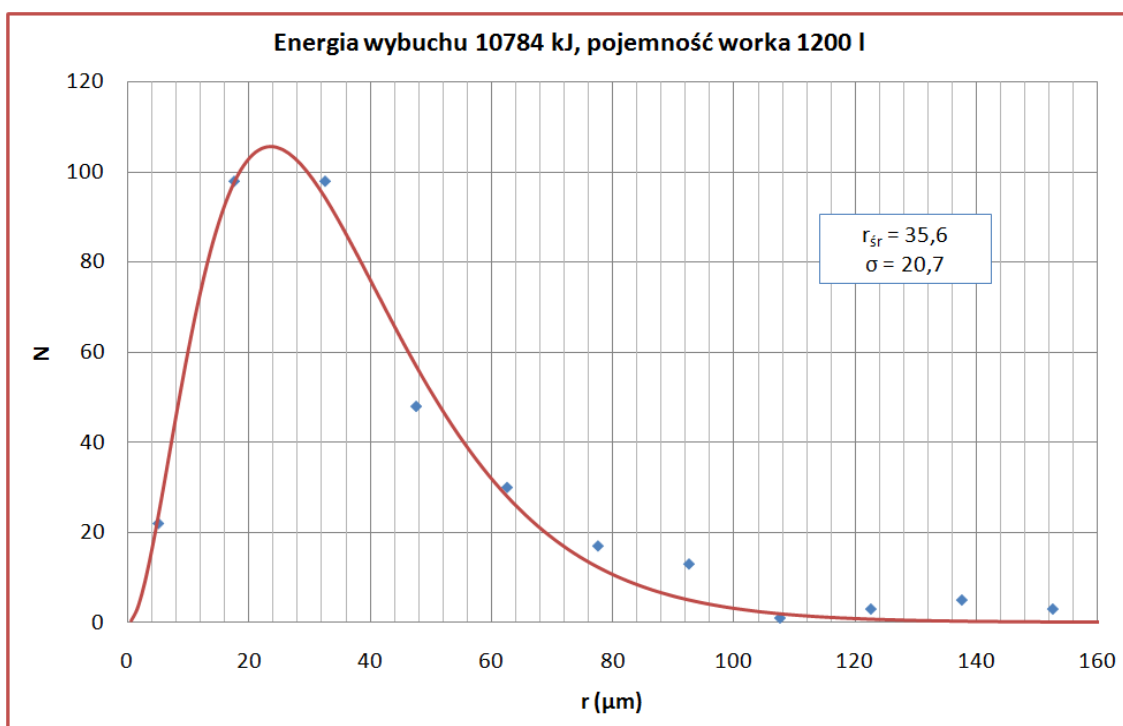
Histogram uzyskanych średnic kropeł aerozolu wodnego przedstawiony jest na Rysunku 6.5.2.4.10. Do uzyskanych wyników został dopasowany rozkład dany wzorem (6.5.2.4.2) (metodą najmniejszych kwadratów). Uzyskano wartość średnią promienia kropeł (wartość oczekiwaną rozkładu kropeł) $r_{sr} = 7,7 \mu\text{m}$ przy odchyleniu standardowym $\sigma = 3,9 \mu\text{m}$. Współczynnik korelacji wyniósł $r = 0,990$. Podczas analizy uzyskanych wyników należy brać pod uwagę dużą liczebność kropeł zarejestrowanych w tym cyklu doświadczeń.



Rysunek 6.5.2.4.10. Histogram obrazujący zróżnicowanie zarejestrowanych średnic kropeł dla próby, w której wykorzystano worki o pojemności 600 l z ładunkiem wybuchowym Emulinitem o energii wybuchu około 7,3 MJ. Wykres zawiera dopasowany rozkład dany równaniem (6.5.2.4.2), którego niektóre parametry przedstawiono w obszarze rysunku (r_{sr} – wartość oczekiwana, σ – odchylenie standardowe)

6. ANALIZA WYNIKÓW

Trzeci cykl doświadczeń obejmował cztery próby, w których wykorzystano worki o pojemności 1200 l z ładunkiem aerozolującym o energii wybuchu 10784 kJ. W dwóch próbach nie udało się uzyskać wyników (w jednym przypadku złe ustawienia parametrów rejestratora, a w drugim zawodność pobudzacza materiału wybuchowego). Histogram uzyskanych średnic kropeł aerozolu wodnego przedstawiony jest na Rysunku 6.5.2.4.11. Do uzyskanych wyników został dopasowany rozkład dany wzorem (6.5.2.4.2) (metodą najmniejszych kwadratów). Uzyskano wartość średnią promienia kropeł (wartość oczekiwaną rozkładu kropeł) $r_{\text{sr}} = 35,6 \mu\text{m}$ przy odchyleniu standardowym $\sigma = 20,7 \mu\text{m}$. Współczynnik korelacji wyniósł $r = 0,993$. Podczas analizy uzyskanych wyników należy brać pod uwagę dużą liczebność kropeł zarejestrowanych w tym cyklu doświadczeń.

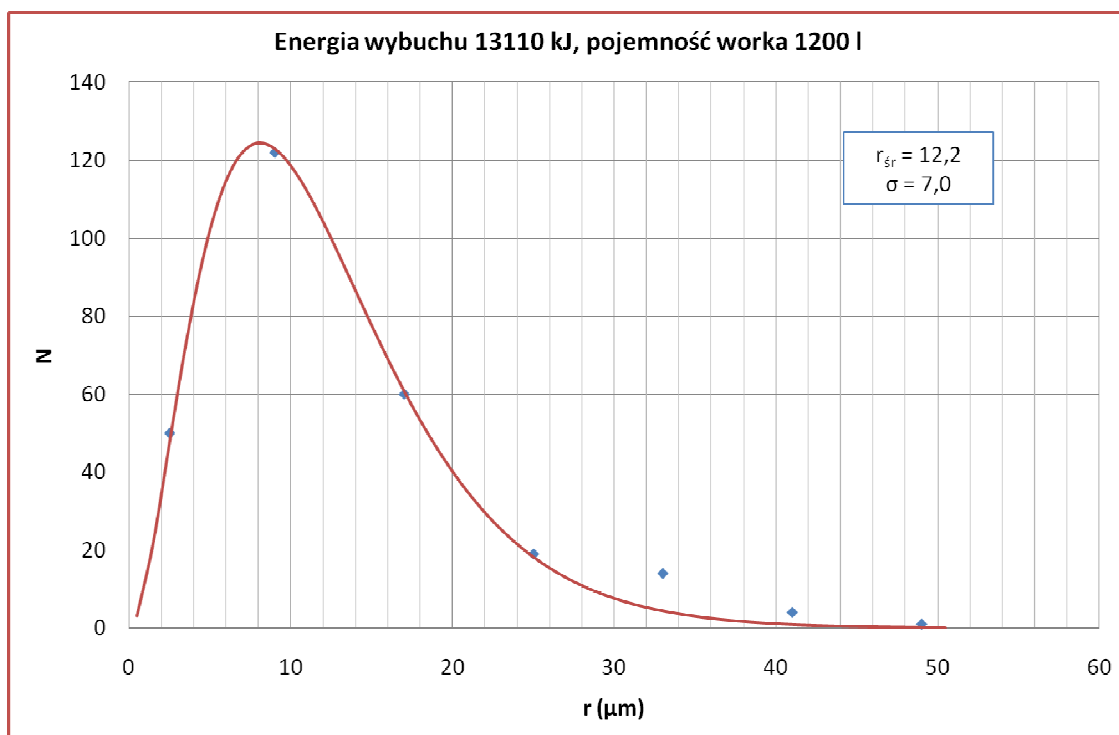


Rysunek 6.5.2.4.11. Histogram obrazujący zróżnicowanie zarejestrowanych średnic kropeł dla próby, w której wykorzystano worki o pojemności 1200 l z ładunkiem wybuchowym Emulinitem o energii wybuchu około 10,8 MJ. Wykres zawiera dopasowany rozkład dany równaniem (6.5.2.4.2), którego niektóre parametry przedstawiono w obszarze rysunku (r_{sr} – wartość oczekiwana, σ – odchylenie standardowe)

6. ANALIZA WYNIKÓW

Czwarty cykl doświadczeń obejmował trzy próby, w których wykorzystano worki o pojemności 1200 l z ładunkiem aerozolującym o energii wybuchu 13110 kJ. W jednej próbie nie udało się uzyskać wyników (złe ustawienia parametrów rejestratora).

Histogram uzyskanych średnic kropeł aerozolu wodnego przedstawiony jest na Rysunku 6.5.2.4.12. Do uzyskanych wyników został dopasowany rozkład dany wzorem (6.5.2.4.2) (metodą najmniejszych kwadratów). Uzyskano wartość średnią promienia kropeł (wartość oczekiwaną rozkładu kropeł) $r_{sr} = 12,2 \mu\text{m}$ przy odchyleniu standardowym $\sigma = 7,0 \mu\text{m}$. Współczynnik korelacji wyniósł $r = 0,997$. Podczas analizy uzyskanych wyników należy brać pod uwagę dużą liczebność kropeł zarejestrowanych w tym cyklu doświadczeń.

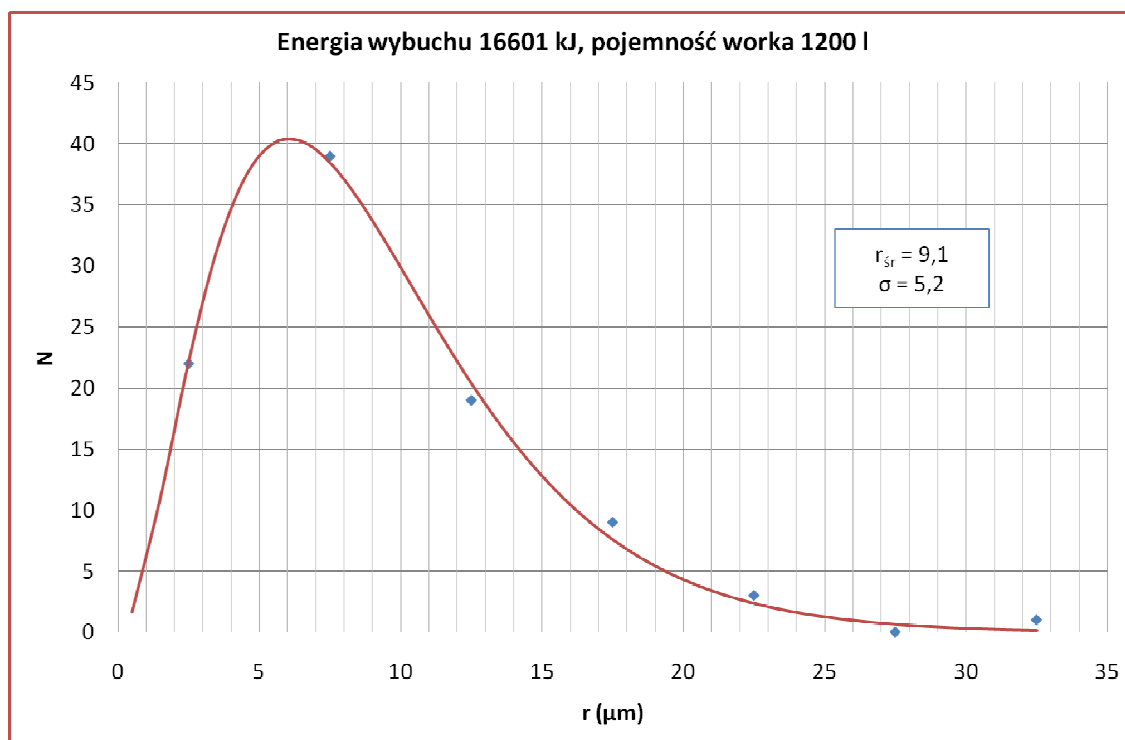


Rysunek 6.5.2.4.12. Histogram obrazujący zróżnicowanie zarejestrowanych średnic kropeł dla próby, w której wykorzystano worki o pojemności 1200 l z ładunkiem wybuchowym Emulinitem o energii wybuchu około 13,1 MJ. Wykres zawiera dopasowany rozkład dany równaniem (6.5.2.4.2), którego niektóre parametry przedstawiono w obszarze rysunku (r_{sr} – wartość oczekiwana, σ – odchylenie standardowe)

6. ANALIZA WYNIKÓW

Piąty cykl doświadczeń obejmował cztery próby, w których wykorzystano worki o pojemności 1200 l z ładunkiem aerozolującym o energii wybuchu 16601 kJ. W jednej próbie nie udało się uzyskać wyników (złe ustawienia parametrów rejestratora).

Histogram uzyskanych średnic kropeł aerozolu wodnego przedstawiony jest na Rysunku 6.5.2.4.13. Do uzyskanych wyników został dopasowany rozkład dany wzorem (6.5.2.4.2) (metodą najmniejszych kwadratów). Uzyskano wartość średnią promienia kropeł (wartość oczekiwaną rozkładu kropeł) $r_{sr} = 9,1 \mu\text{m}$ przy odchyleniu standardowym $\sigma = 5,2 \mu\text{m}$. Współczynnik korelacji wyniósł $r = 0,998$. Podczas analizy uzyskanych wyników należy brać pod uwagę dużą liczebność kropeł zarejestrowanych w tym cyklu doświadczeń.



Rysunek 6.5.2.4.13. Histogram obrazujący zróżnicowanie zarejestrowanych średnic kropeł dla próby, w której wykorzystano worki o pojemności 1200 l z ładunkiem wybuchowym Emulinitem o energii wybuchu około 16,6 MJ. Wykres zawiera dopasowany rozkład dany równaniem (6.5.2.4.2), którego niektóre parametry przedstawiono w obszarze rysunku (r_{sr} – wartość oczekiwana, σ – odchylenie standardowe)

6. ANALIZA WYNIKÓW

Zastosowanie metody optycznej wykorzystującej rejestrator kropeł pozwoliło na oszacowanie ich wielkości. Do zgromadzonych danych możliwe było dopasowanie rozkładów danych wzorem (6.5.2.4.2), które w zadowalający sposób odzwierciedlały różnorodność wielkości drobin aerozolu. W Tabeli 6.5.2.4.1 zestawione są wyniki uzyskane dla wszystkich pięciu cykli doświadczalnych. Zawarte tu są informacje o rodzaju próby (wielkości ładunku wybuchowego i pojemności kapsuły wodnej) oraz parametrach dopasowanych rozkładów.

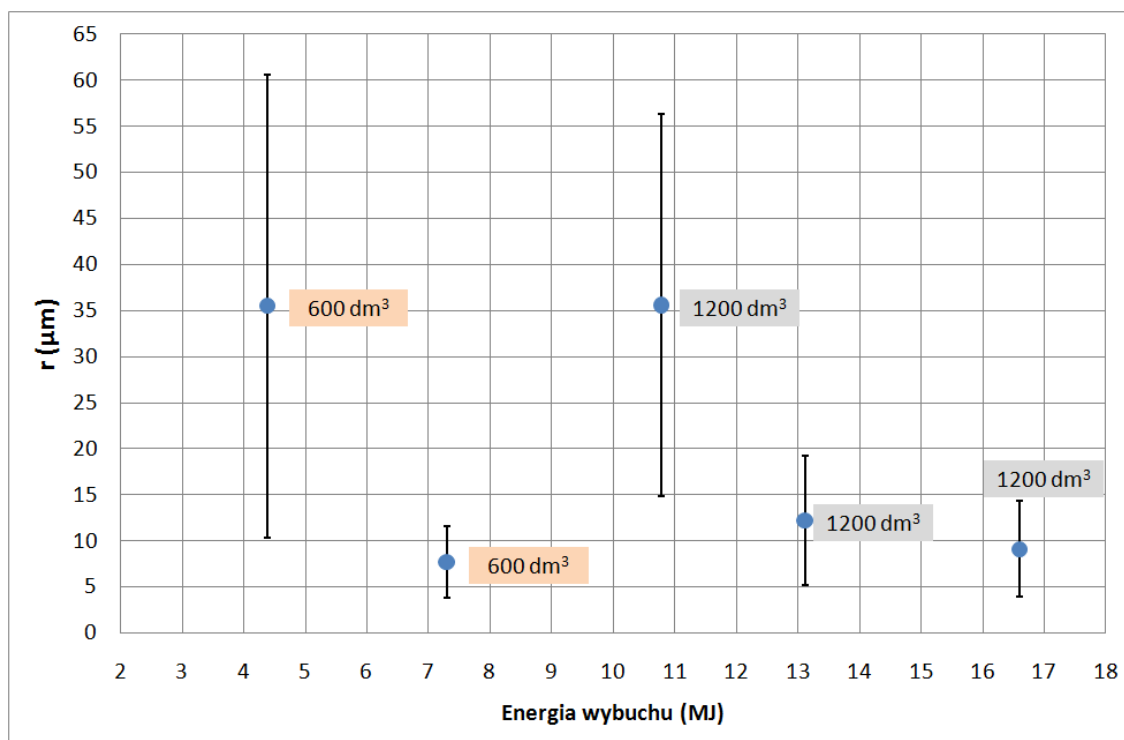
Tabela 6.5.2.4.1. Zestawienie parametrów dopasowanych rozkładów danych równaniem (6.5.2.4.2) dla wszystkich wykonanych grup doświadczeń (różnych konfiguracji pojemność worka – energia wybuchu)

Energia wybuchu (kJ)	Pojemność worka (dm ³)	Średni promień kropeł E(r) (μm)	Odchylenie standardowe σ(r) (μm)	N ₀	μ	a ₀
4384	600	35,5	25,1	0,8	1,0	17,9
7293	600	7,7	3,9	8,8	2,8	5,7
10784	1200	35,6	20,7	1,6	2,0	23,5
13110	1200	12,2	7,0	14,0	2,0	8,1
16601	1200	9,1	5,2	8,0	2,0	6,1

Graficzna prezentacja wyników zawartych w Tabeli 6.5.2.4.1 przedstawiona jest na Rysunku 6.5.2.4.14. Wykres ten przedstawia zależność średnicy uzyskanych kropeł od energii ładunku aerozolującego. Słupki błędów dla poszczególnych wyników obrazują otrzymane odchylenie standardowe. Błąd pomiaru energii wybuchu nie jest tu wyszczególniony ponieważ nie jesteśmy w stanie go oszacować. Parametry katalogowe stosowanego Emulinitu nie pozwalają na otrzymanie miarodajnych danych – są to wartości średnie, które, jak potwierdziły nasze doświadczenia, mogą znacząco różnić się od parametrów rzeczywistych. Niejednorodność parametrów materiału wybuchowego było przyczyną znacznych różnic w procesie formowania się chmury i dlatego z 19 przeprowadzonych doświadczeń tylko 11 zakończyło się zebraniem danych.

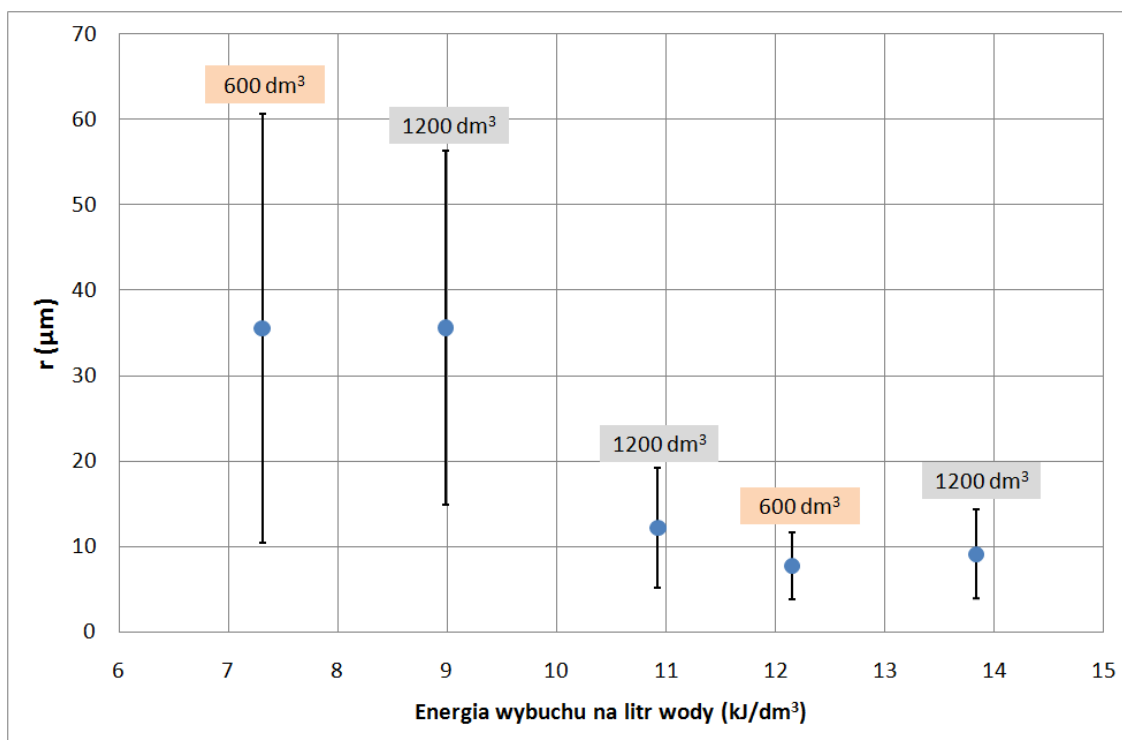
6. ANALIZA WYNIKÓW

Na podstawie Rysunku 6.5.2.4.14 można stwierdzić, że żaden z pięciu cykli badawczych nie charakteryzował się znacząco odmiennymi wynikami. Zatem można uznać wszystkie uzyskane wyniki za wiarygodne (popętnienie błędów grubych w procesie pomiaru średnic kropeł jest bardzo mało prawdopodobne).



Rysunek 6.5.2.4.14. Zależność średniej średnicy kropeł aerozolu wodnego (wartości oczekiwanej rozkładu) wraz z błędem równym odchyleniu standardowemu uzyskana dla wszystkich grup zarejestrowanych doświadczeń w funkcji energii wybuchu (w oparciu o rozkład (6.5.2.4.2))

Do ilościowej analizy zgromadzonych wyników może posłużyć Rysunek 6.5.2.4.15, na którym zaprezentowano zależność promienia kropeł od energii wybuchu przypadającą na litr aerozolowanej wody. Wykres ten obrazuje, z bardzo dużym prawdopodobieństwem, że dla większych energii jednostkowych uzyskuje się mniejsze promienie kropeł aerozolu wodnego (dla zakresu zmienności energii w wykonanych próbach: od około 7 kJ/dm^3 do 14 kJ/dm^3). Tendencja ta dotyczy wszystkich wykonanych doświadczeń. Dane zaprezentowane na Rysunku 6.5.2.4.15 mogą posłużyć do weryfikacji modeli zjawiska wybuchowego aerozolowania.



Rysunek 6.5.2.4.15. Zależność średniej średnicy kropelek aerozolu wodnego (wartości oczekiwanej rozkładu) wraz z błędem równym odchyleniu standardowemu uzyskana dla wszystkich grup zarejestrowanych doświadczeń w funkcji energii wybuchu przypadającej na liter wody zgromadzonej w kapsule (w oparciu o rozkład (6.5.2.4.2))

6.6 OSZACOWANIE WIELKOŚCI ENERGII ZUŻYTEJ NA FRAGMENTACJĘ WODY ZGROMADZONEJ W KAPSULE

Energia wyzwolona podczas detonacji ładunku wybuchowego, umieszczonego w kapsule wodnej, zostaje wykorzystana do szeregu różnych procesów. Ze względu na najistotniejsze zastosowanie aerozolowania wybuchowego, jakim jest gaszenie pożarów, w Rozdziale 3 tej rozprawy założono dyssypację do trzech kanałów – zgodnie z równaniem (3.1). Oszacowanie ilości energii zużytej na fragmentację wody zgromadzonej w kapsule można wykonać w oparciu o wzory (3.17) oraz (3.31). Szacunki te mogą być dokonane na podstawie wyników pomiarów promieni kropelek aerozolu, które opisane zostały w podrozdziale 6.5. Wyniki przedstawione są w Tabeli 6.6.1 oraz Tabeli 6.6.2. Rezultaty z obu metod są różne (porównanie dwóch ostatnich

6. ANALIZA WYNIKÓW

kolumn), aczkolwiek rząd wielkości energii jest taki sam. Uwiarygodnia to tym samym każdą z metod szacowania.

Tabela 6.6.1. Zestawienie oszacowań energii zużytej na fragmentację wody zgromadzonej w kapsule wodnej. Oszacowań dokonano w oparciu o wzór (3.31). Ostatnia kolumna tabeli zawiera udział energii fragmentacji w odniesieniu do całkowitej energii detonacji (wynik wyrażony w ‰)

Energia wybuchu (kJ)	Pojemność worka (dm ³)	Średni promień kropeł (μm)	Odchylenie standardowe (μm)	m ₂	m ₃	E _{frag} (MJ)	E _{frag} /E _{exp} (‰)
4384	600	30	18	1209	57897	0,003	0,6
7293	600	16	21	674	44547	0,002	0,3
10784	1200	40	29	2405	198889	0,003	0,3
13110	1200	13	11	275	9133	0,008	0,6
16601	1200	9	6	109	1739	0,016	1,0

Tabela 6.6.2. Zestawienie oszacowań energii zużytej na fragmentację wody zgromadzonej w kapsule wodnej. Oszacowań dokonano na podstawie wzoru (3.17) w oparciu o parametry rozkładu danego wzorem (6.5.2.4.2). Ostatnia kolumna tabeli zawiera udział energii fragmentacji w odniesieniu do całkowitej energii detonacji (wynik wyrażony w ‰)

Energia wybuchu (kJ)	Pojemność worka (dm ³)	Średni promień kropeł E(r) (μm)	Odchylenie standardowe σ(r) (μm)	E _{frag} (MJ)	E _{frag} /E _{exp} (‰)
4384	600	36	25	0,004	0,8
7293	600	8	4	0,017	2,3
10784	1200	36	21	0,007	0,7
13110	1200	12	7	0,021	1,6
16601	1200	9	5	0,029	1,7

Na podstawie przedstawionych powyżej wyników można stwierdzić, że ilość energii zużytej na fragmentację to około 1‰ całkowitej energii wyzwolonej podczas detonacji ładunku wybuchowego (uzyskane wyniki są z przedziału od 0,3 ‰ do 2,3 ‰).

7. PODSUMOWANIE

Zjawiska zachodzące podczas aerolizacji wybuchowej są na tyle złożone, że dotychczas nikt skutecznie nie podjął tego tematu. Istnieją różnego rodzaju publikacje (np. [2, 4, 31-33]), które poruszają niektóre z występujących tu procesów. Występujące tam symulacje, niekiedy potwierdzone na drodze doświadczalnej, odnoszą się do ilości wody o kilka rzędów wielkości mniejszych niż te, jakie były przedmiotem tej pracy. Ponadto publikacje te dotyczą tylko procesu powstawania aerozolu wodnego, który ma miejsce dla czasów od chwili detonacji materiału wybuchowego do około 1 ms. Zaprezentowana tu praca odnosi się do procesu rozprzestrzeniania się chmury aerozolu, a zadaniem autora nie było wyjaśnianie procesu jego powstawania. Celem pracy było stworzenie modelu zjawiska rozprzestrzeniania się chmury aerozolu, który pozwoli opisać występujące tu procesy. Wybór tematyki poruszanych zagadnień podyktowany był głównie przez skuteczność gaśniczą, bowiem jednym z zastosowań aerolizacji wybuchowej jest gaszenie pożarów.

Powstawanie aerozolu wodnego jest niezwykle złożonym zjawiskiem fizycznym. Z racji tego, że dotychczas nikomu nie udało się skutecznie opisać danego zjawiska, autor tej pracy zastosował odmienne podejście do danego tematu. Zaproponowane tu zostały bardzo proste modele, które miały na celu jak najwierniejsze odtworzenie omawianych zjawisk. Tego typu podejście przyniosło nadzwyczaj trafną zbieżność z danymi doświadczalnymi.

W pracy podjęto próbę analizy niektórych zagadnień, które wiążą się z powstawaniem aerozolu wodnego, a które to mogą być przydatne m.in. do wdrożenia produkcyjnej danej metody. Opracowanie to omawia następujące aspekty produkcji aerozolu wodnego:

- konstrukcja kapsuły wodnej,
- rozmieszczenie ładunku wybuchowego w kapsule wodnej,
- dobór optymalnego rodzaju ładunku wybuchowego do produkcji aerozolu,
- dobór optymalnych wielkości (energii) ładunku wybuchowego do różnych wielkości kapsuł wodnych,

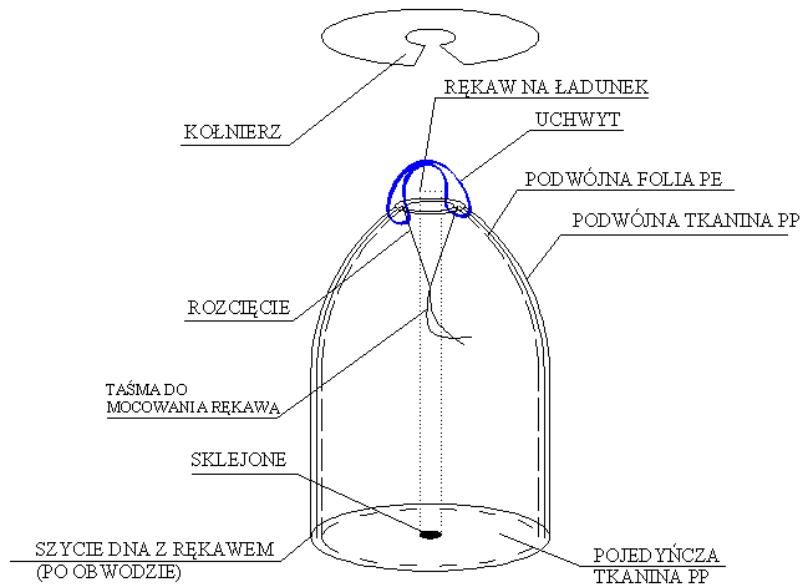
- wpływ zmiany współczynnika napięcia powierzchniowego na wielkość kropeł i średnicę chmury aerozolu wodnego,
- wielkość kropeł aerozolu wodnego.

Wyniki te oparte są o rozważania teoretyczne oraz potwierdzone są na drodze doświadczalnej. Cały cykl doświadczeń obejmował ponad 150 prób.

Na podstawie rozważań analitycznych ustalona została optymalna konfiguracja ładunku wybuchowego – konfiguracja cylindryczna (Rysunek 2.1). Rozważania poczyniono na podstawie założenia, że krople aerozolu są równej wielkości oraz, że ekspansja odbywa się w taki sposób, iż chmura aerozolu rozprzestrzenia się symetrycznie na zewnątrz kapsuły, a w środku powstaje pusta przestrzeń, która to jest wynikiem przemieszczenia zgromadzonych w niej początkowo kropeł. W wyniku detonacji ładunku wybuchowego umieszczonego w kapsule wodnej powstają krople, które nie są równej wielkości, i które to można opisać przy pomocy pewnego rozkładu statystycznego. Traktowanie zatem, że krople mają równą wielkość może być dopuszczalne, gdy założymy, że jest to ich pewna średnia wielkość.

Konfiguracja cylindryczna stała się podstawą do zaprojektowania kapsuły wodnej, której widok przedstawiony jest na Rysunku 7.1. Rzeczywisty model kapsuły jest złożeniem konfiguracji cylindrycznej i sferycznej, ze znaczną przewagą tej pierwszej. Zbliżenie się do założonego układu uzyskane zostało nie tylko poprzez kształt kapsuły, ale również poprzez zastosowanie dodatkowego ładunku wybuchowego. Jego zadaniem nie jest fragmentacja ani przyspieszenie kropeł, lecz uzyskanie rozprzestrzeniania się aerozolu zgodnego z konfiguracją cylindryczną. Ładunek ten detonowany jest z niewielkim opóźnieniem w stosunku do ładunku głównego. Rozwiązanie takie powoduje, że chmura aerozolu znacznie mniej rozprzestrzenia się w kierunku przeciwnym niż źródło ognia.

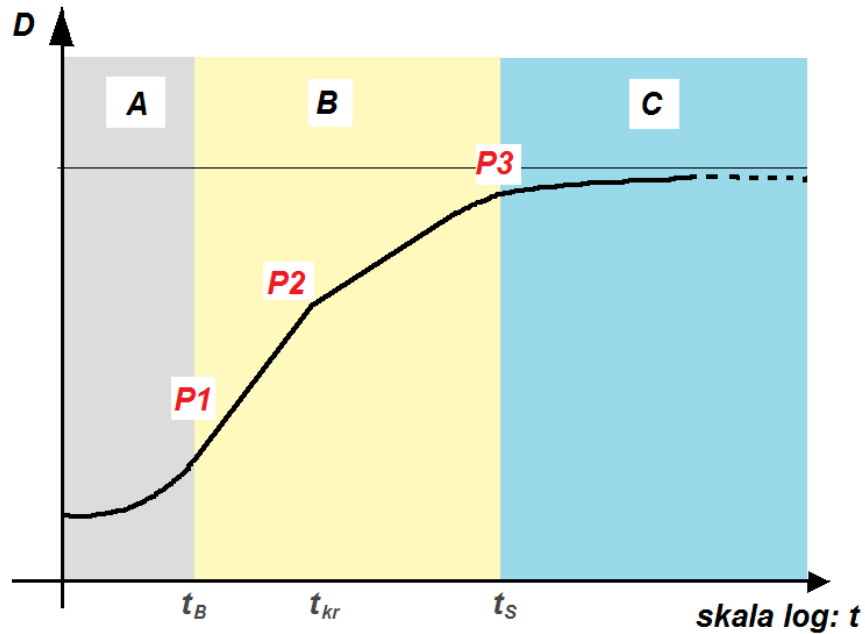
Na podstawie wprowadzonego uproszczenia o jednakowej wielkości kropeł aerozolu, wyprowadzenie zostało równanie opisujące wielkość kropeł aerozolu wodnego - wzór (3.18), jako funkcja energii eksplozji zużytej na fragmentację. Na jego podstawie można oszacować ilość energii, jaka zostaje zużyta na fragmentację wody zgromadzonej w kapsule. Wynosi ona około 1% całkowitej energii detonacji. Zatem można stwierdzić, że niemal cała energia wybuchu dyssypuje się do dwóch kanałów: E_{acc} i E_{loss} (zgodnie z równaniem (3.1)).



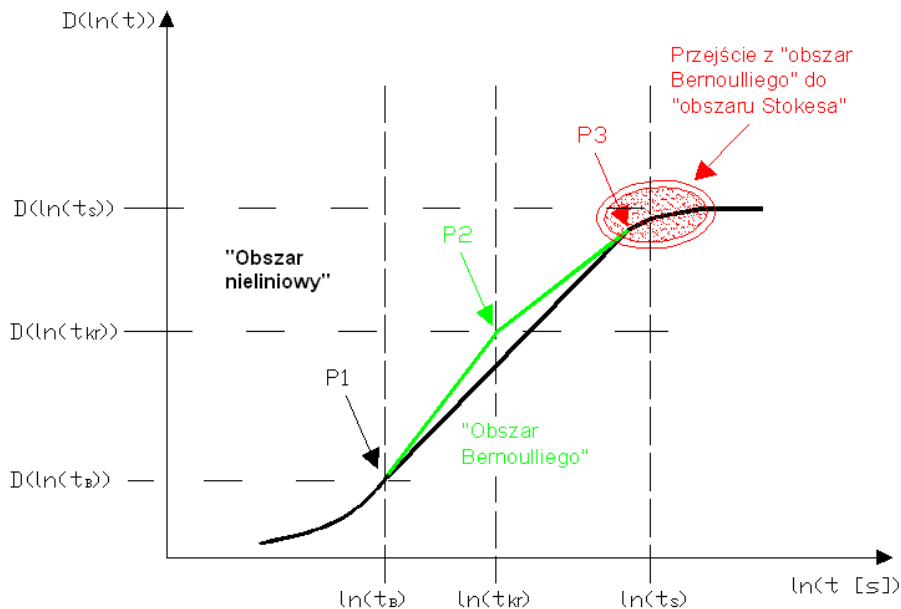
Rysunek 7.1. Wypracowany podczas testów projekt kapsuły wodnej

W pracy wyznaczone zostały wzory określające średnicę chmury aerozolu wodnego w funkcji czasu rozprzestrzeniania (przypadek Bernoulliego – równanie (5.14) i Stokesa – równanie (5.19)).

Podsumowanie rozważań teoretycznych, nad zjawiskiem rozprzestrzeniania się chmury aerozolu wodnego, jest przedstawione na Rysunku 7.2, na którym zaznaczone są wszystkie charakterystyczne obszary rozprzestrzeniania: nieliniowy, Bernoulliego (liniowy lub podwójnie liniowy) i Stokesa. Jedynie pierwszy z tych obszarów – dotyczący czasu od chwili detonacji do około 1 ms, nazywany nieliniowym nie został opisany w pracy, gdyż wykracza to poza cele tej rozprawy.



Rysunek 7.2. Rozprzestrzenianie się chmury aerozolu wodnego – wynikające z rozważań teoretycznych (A – obszar nieliniowy, B – obszar Bernoulliego, C - obszar Stokesa, P1 – punkt, w którym następuje przejście z „obszaru nieliniowego” do „obszaru Bernoulliego”, P2 – punkt, w którym następuje zmiana charakterystyki rozprzestrzeniania, P3 – punkt, w którym kończy się „obszar Bernoulliego” i zaczyna „obszar Stokesa”)



Rysunek 7.3. Rozprzestrzenianie się chmury aerozolu wodnego – wynikające z przeprowadzonych doświadczeń (opis oznaczeń przedstawiony jest na Rysunku 7.2)

Model teoretyczny rozprzestrzeniania się chmury aerozolu został zweryfikowany doświadczalnie. Na Rysunku 7.3 przedstawiony został wykres ekspansji chmury uzyskany na podstawie doświadczeń. Porównanie Rysunku 7.2 i 7.3 skłania do wniosku, iż modele zaproponowane w tej pracy są wystarczająco zgodne z danymi uzyskanymi doświadczalnie.

W pracy postawiona została hipoteza wyjaśniająca występowanie punktu P2 – Rysunek 7.3 (występowanie funkcji podwójnie liniowej w obszarze Bernoulliego). Wyjaśnienie to opierało się na przypuszczeniu, iż podczas ekspansji chmury, krople uzyskują promień i prędkość, dla których ich liczba Re ma wartość około $3 \cdot 10^5$. Wówczas występowała by tu gwałtowna zmiana współczynnika oporu aerodynamicznego kropli („kryzys oporu”), co w konsekwencji objawiło by się zmianą współczynnika oporu, a następnie owocowało zmianą charakterystyki rozprzestrzeniania – zależności średnicy od czasu. Hipoteza ta została obalona.

Na podstawie wzorów (3.18) i (6.3.1) dokonano oszacowania promienia kropeł aerozolu wodnego oraz ich prędkości przy przejściu chmury przez krytyczną liczbę Re . Otrzymane rezultaty (przedstawione w Tabeli 6.3.1.) wskazują, iż poddźwiękowym zakresom prędkości odpowiadają kilkucentymetrowe promienie kropeł. Jest to dowód na to, iż występowanie punktu P2 nie jest związane z „kryzysem oporu” (dane doświadczalne wskazują, iż prędkość chmury aerozolu jest mniejsza od prędkości dźwięku).

Postawiona została druga hipoteza wyjaśniająca występowanie punktu P2:

- ✓ woda zgromadzona w kapsule zostaje podzielona, w chwili eksplozji, na N jednakowych kropeł, które są następnie rozpędzane do prędkości poddźwiękowych (100 m/s do 200 m/s),
- ✓ w początkowej fazie ruchu na krople aerozolu wodnego działa relatywnie duża siła oporu, której skutkiem jest podział kropeł; nowo powstałe krople poruszają się z mniejszymi prędkościami, niż krople z których one powstały (obdzieranie warstwowe kropeł [30-32]),
- ✓ podział kropeł odbywa się do chwili, gdy krople aerozolu wodnego będą miały na tyle małe rozmiary i prędkości dla których nie będzie możliwy podział (siła oporu aerodynamicznego powodująca podział jest wprost proporcjonalna do powierzchni kropeł i kwadratu ich prędkości).
- ✓ koniec obszaru podziału kropeł to punkt P2.

Za przyjęciem tej hipotezy przemawiają wykresy prędkości chwilowej chmury aerozolu wodnego (Rysunek 7.3). Dla wszystkich prób, które różniły się m.in. wielkościami kapsuły, rodzajem ładunku wybuchowego czy jego wielkością (energiją) zaobserwowane zostało, iż po pewnym czasie (około 300 ms) przebiegi są takie same. Różnica występuje jedynie na początku ekspansji.

Rozważania teoretyczne dotyczące formownia się kropli aerozolu wodnego doprowadziły do wniosku, iż wielkość średnicy kropli jest proporcjonalna do współczynnika napięcia powierzchniowego wody K – (wzór 3.18). Na podstawie serii prób ustalono, że w próbach gdzie jest on obniżony, występuje:

- większa średnica chmury aerozolu w początkowych chwilach ekspansji: dla czasu nie przekraczającego 100 ms (w odniesieniu do prób z samą wodą),
- mniejsza średnica chmury aerozolu w późniejszych chwilach ekspansji: dla czasu przekraczającego 100 ms (w odniesieniu do prób z samą wodą).

Prędkość kropeł zależy od ich wielkości – im mniejsze krople tym mniejsza ich prędkość. Przy obniżeniu napięcia powierzchniowego cieczy, po detonacji ładunku wybuchowego, tworzą się krople o mniejszej wielkości, które w „obszarze nieliniowym” uzyskują relatywnie większe prędkości. Następnie są one wyhamowywane w powietrzu. To, że mają one mniejszą wielkość (w odniesieniu do prób z nie obniżonym współczynnikiem napięcia powierzchniowego) wnioskuje z tego, że chmura aerozolu ma mniejszą prędkość chwilową i mniejszy zasięg.

Wyznaczenie promienia kropeł aerozolu wodnego można przeprowadzić na podstawie szybkości jego opadania. Gdy krople aerozolu opadają ruchem jednostajnym, wówczas działają na nie dwie równoważące się siły – oporu Stokesa oraz ciężkości. Przystawienie równań tych sił pozwala na otrzymanie zależności promienia kropli od prędkości opadania – wzór (6.5.1.3).

Prędkości opadania wyznaczone zostały dla dwóch rodzajów mediów aerozolowanych: wody i wody z dodatkiem alkoholu izobutyłowego.

Wyniki prędkości opadania dla wszystkich wymienionych prób są prawie jednakowe i mieszczą się w przedziale $\langle 0,3; 1,0 \rangle$ m/s. Prędkości te przekładają się na średnice aerozolu wodnego z przedziału (140 ± 25) μm .

Powstawanie i rozprzestrzenianie się kropeł aerozolu dla wody oraz wody z dodatkiem alkoholu izobutyłowego jest nieco inne. W tym drugim przypadku aerozol

znacznie szybciej zaczyna opadać ruchem jednostajnym. Można zatem postawić tezę, iż obniżenie napięcia powierzchniowego wody powoduje wytworzenie mniejszych kropeł (w odniesieniu do prób z samą wodą), które następnie nie ulegają podziałowi na mniejsze – nie występuje tu zjawisko „obdzierania kropeł”.

Pomiar wielkości kropeł aerozolu wodnego wytworzonego metodą wybuchową wykonano dwoma sposobami. Pierwszy z nich – metoda opadania, pozwolił na wyznaczenie średnic kropeł, które opadały ruchem jednostajny. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów, ustalono, że ten rodzaj opadania odbywa się po czwartej lub piątej sekundzie ekspansji. Metoda ta pozwoliła na śledzenie prędkości opadania tylko górnych fragmentów obrysów chmury, a w związku z tym otrzymane wyniki dotyczą tylko tej frakcji aerozolu. Wyznaczone średnice posłużyły do zaprojektowania urządzenia, które wykorzystano w drugiej metodzie – optycznej. Polegała ona na wystawieniu płytki szklanej na działanie aerozolu na ściśle określony czas. Płytką pokrywała się kroplami aerozolu i dzięki temu można było oszacować ich promienie.

W metodzie opadania uzyskano średnice kropeł, dla wszystkich przeprowadzonych doświadczeń, z przedziału $(140 \pm 25) \mu\text{m}$. Niezależnie od wielkości kapsuł i energii wybuchu zawsze otrzymywano zbliżone wartości wielkości kropeł. Dlatego uważam, że metoda ta pozwoliła wykonać pomiary średniej średnicy aerozolu zawsze tej samej frakcji. Powodem tego jest fakt, że analizie można było podać jedynie górny obrys chmury aerozolu.

Metoda optyczna wykorzystująca rejestrator kropeł pozwoliła na zapoznanie się z rozmiarami kropeł w środku obłoku aerozolu wodnego (płytką rejestratora była wystawiona na jego działanie w czasie od około 600 ms do około 900 ms, a więc już po przejściu czoła chmury). W badaniach wykonano pomiar średnic kropeł dla pięciu różnych konfiguracji ładunku wybuchowego i ilości medium aeroszowanego. Uzyskane wyniki ukazały zróżnicowanie wielkości średnic kropeł aerozolu wodnego z przedziału od kilku do $319 \mu\text{m}$. Do uzyskanych wyników, w zadowalający sposób, można było dopasować rozkłady dane wzorem (6.5.2.4.2). Zestawienie wszystkich otrzymanych tą metodą wyników przedstawione jest w Tabeli 6.5.2.4.1 oraz na Rysunku 6.5.2.4.14 i 6.5.2.4.15.

Podczas szacowania wielkości kropeł przy pomocy metody optycznej zaistniał pewien problem. Mianowicie kropla aerozolu w powietrzu ma inną geometrię niż na płycie szklanej (patrz Rysunek 6.5.2.4.1). Zatem zmierzona średnica kropli na płycie szklanej rejestratora nie jest szukaną wielkością i należy wykonać korekcję transformującą do

wartości właściwej. W tym celu wyznaczone zostały średnice pewnych kropeł w powietrzu (na podstawie teorii Fraunhofera, dotyczącej analizy natężenia światła rozproszonego przez krople sferyczne) oraz na płytkach szklanych pokrytych sadzą. Pozwoliło to na wyznaczenie współczynników skalujących. Tego typu podejście nie uwzględnia jednak tego, że średnica kropli na płytce jest funkcją m.in. takich parametrów jak wielkość padającej kropli, prędkość uderzenia w płytkę i kąt ustawienia płytki względem ziemi. Ze względu na brak możliwości wyznaczenia prędkości każdej kropli wyznaczenie danej funkcji jest niemożliwe. Zatem przy interpretacji wyników otrzymanych metodą optyczną należy uwzględnić ten fakt. Szacuję, że omówiona tu procedura nie wypacza w znaczący sposób uzyskanych wyników, które mogą różnić się od właściwych o kilka procent (średnice rzeczywiste będą nieznacznie mniejsze od wyznaczonych). Uwzględniając cel tej pracy, jakim jest m.in. oszacowanie skuteczności gaśniczej aerozolu wodnego produkowanego metodą wybuchową, wspomniane uproszczenie nie ma praktycznie żadnego znaczenia.

Analizując rozmiary otrzymanych promieni kropeł z metody optycznej, zauważono, że w miarę zwiększania energii detonacji przypadającej na litr wody zgromadzonej w kapsule promienie kropeł są mniejsze. Taka tendencja utrzymuje się dla wszystkich przeprowadzonych doświadczeń – przedział zmienności energii detonacji od 7 kJ/dm^3 do 14 kJ/dm^3 . Graficzne ukazanie tej zależności wykonane jest na Rysunku 6.5.2.4.15. Tendencja ta nie jest zależna od ilości wody zgromadzonej w kapsule wodnej. Wyniki zgromadzone na Rysunku 6.5.2.4.15 mogą posłużyć do weryfikacji modeli opisujących zjawisko wybuchowego aerozolowania.

Kapsuły wodne w rzeczywistych warunkach będą zrzucane z helikoptera. Omawiane w pracy obserwacje dotyczyły „prób statycznych” (kapsuła nieruchoma, zamocowana na linie). Po przeprowadzeniu prób helikopterowych można stwierdzić, iż modelowanie „statyczne” jest w wystarczający sposób zbliżone do modelowania „dynamicznego”. Zarówno zasięg jak i kształt chmury odpowiada przewidywaniom.

Jednym z istotniejszych celów tej pracy było zoptymalizowanie parametrów kapsuły, mające na celu uzyskanie chmury aerozolu składającej się z jak najmniejszych kropeł oraz spowodowanie pokrycia aerozolem żądanego obszaru powierzchni, na którą aerozol opada. Na podstawie wykonanych doświadczeń zauważone zostało zjawisko nazywane w pracy „przedmuchaniem”. Polegało ono na tym, że przy niektórych próbach uzyskiwano mniejszy zasięg chmury przy zwiększonym ładunku wytwarzającym aerozol. Zjawisko to jest niepożądane nie tylko ze względu na mniejszy

zasięg chmury. Przedmuchiwanie jest odpowiedzialne za powstanie wyższego ciśnienia w obrębie obszaru prowadzonych badań, co może skutkować zniszczeniami w obszarze zrzutu kapsuły. Optymalizacja parametrów kapsuły polegała głównie na dobraniu odpowiedniego ładunku wybuchowego (energii wybuchu) do testowanych wielkości kapsuł.

Kolejnym elementem optymalizacji parametrów kapsuły było dobranie najefektywniejszego rodzaju ładunku wybuchowego używanego do produkcji aerozolu. W testach wykorzystano trzy rodzaje: Emulinit, Saletrol, Plastik. Wybór ten podyktowany został przede wszystkim tym, że materiały te posiadały odmienne wartości parametru jaki jest prędkość detonacji. Zakłada się bowiem, że ten czynnik ma kluczowe znaczenie przy produkcji aerozolu wodnego. Na podstawie przeprowadzonych doświadczeń można stwierdzić, że najlepsze parametry aerozolu uzyskiwane były przy zastosowaniu Emulinitu. Wyjaśnienie dlaczego właśnie ten materiał jest najlepszy nie jest celem tej pracy.

Przydatność gaszenia pożarów aerozolem wodnym uzależniona jest od skutków jakie towarzyszą detonacji dużych ładunków wybuchowych. Czynnik ten mógłby być przyczyną bezcelowości prezentowanej metody, gdyż zniszczenia wywołane pożarem mogą być podobne jak w przypadku detonacji ładunku wybuchowego. Badania doświadczalne wykazały, że rozkład ciśnień w promieniu do 30 m od centrum eksplozji jest na tyle mały, że dopuszczalna tu jest nawet zwarta zabudowa obiektów mieszkalnych. W zależności od zastosowanego ładunku wybuchowego maksymalne nadciśnienia wynosiły od 9 do 50 kPa (w odległości 5 m od wybuchu), a w odległości 30 m od źródła eksplozji ciśnienie to nie przekraczało 2 do 3 kPa.

Na podstawie zaprezentowanej tu rozprawy możliwe było wyciągnięcie następujących wniosków:

- Optymalne umiejscowienie ładunku wybuchowego w kapsule wodnej to cylindryczne (konfiguracja cylindryczna – Rysunek 2.1).
- Od około 1 ms od chwili detonacji, w ruchu drobin aerozolu wodnego wytworzonego wybuchowo, dominują opory, które są wprost proporcjonalne do kwadratu ich prędkości – *reżim Bernoulliego*. Po znacznym wyhamowaniu chmury, aerozol przechodzi w obszar, gdzie krople doznają oporu wprost proporcjonalnego do ich prędkości – *reżim Stokesa*.
- Występowanie punktu przegięcia (P2 – nagła zmiana charakterystyki rozprzestrzeniania) na wykresie średnicy chmury aerozolu wodnego powstałego

metodą wybuchową w funkcji czasu ekspansji jest związane z końcem procesu *obdzierania kropeł* i nie jest związane z nagłą zmianą współczynnika oporu aerodynamicznego kropeł.

- Zmiana napięcia powierzchniowego wody aerozolowanej wybuchowo powoduje powstanie mniejszych kropeł aerozolu (w odniesieniu do prób, w których nie jest obniżone napięcie powierzchniowe), co powoduje zahamowanie procesu *obdzierania kropeł*.
- Wielkości kropeł aerozolu wodnego dla stosowanych wartości energii eksplozji materiału wybuchowego są rzędu dziesiątek mikrometrów.
- W procesie aerozolowania wybuchowego wody o masie rzędu 1000 kg ilość energii zużytej na fragmentację wody jest rzędu kilku promili całkowitej energii detonacji.
- Rozkłady kropeł otrzymane z pomiarów odpowiadają rozkładom, których dobrym przybliżeniem jest zależność:

$$n_u(r) = \left(\left(\frac{a_0}{\mu} \right)^{\mu+1} \Gamma(\mu + 1) \right)^{-1} r^\mu e^{-\frac{\mu}{a_0} r}$$

gdzie r – promień kropli aerozolu wodnego; a_0 , N_0 , μ to niezależne parametry rozkładu ($\Gamma(\mu + 1)$ to funkcja gamma Eulera).

Kontynuacją zaprezentowanej tu pracy, zdaniem autora, powinno być wykonanie numerycznego modelu procesu aerozolowania wybuchowego. Natomiast elementem praktycznym powinno być wykonanie systemu służącego do gaszenia pożarów, zarówno w wersji stacjonarnej (kapsuły umieszczone w potencjalnie niebezpiecznych miejscach), jak i z możliwością zrzutu z helikoptera na źródło ognia. Prace nad praktyczną realizacją gaszenia ognia są już podejmowane (przy udziale autora tej pracy).

Zaprezentowana rozprawa powinna stanowić wstęp do dalszego rozwijania ujawnionych wątków badawczych, wśród których można wyróżnić następujące zagadnienia:

- oszacowanie ilości energii zużytej na przyspieszenie kropeł aerozolu powstałego metoda wybuchową,
- wyjaśnienie zjawiska spadku zasięgu chmury przy zwiększaniu ilości materiału wybuchowego wytwarzającego aerozol wodny („efekt przedmuchania”),

7. PODSUMOWANIE

- doświadczalne sprawdzenie, czy punkt zmiany charakterystyki rozprzestrzeniania się chmury aerozolu w obszarze Bernoulliego ma związek z końcem zjawiska *obdzierania warstwowego* kropel,
- doświadczalne wyznaczenie rozkładów wielkości kropel aerozolu w funkcji czasu rozprzestrzeniania i odległości od miejsca detonacji.

Załącznik nr 1

POŻARY LASÓW – PRZYCZYNY POWSTAWANIA, WYSTĘPOWANIE POŻARÓW

O zagrożeniu pożarowym lasu decyduje szereg wzajemnie powiązanych czynników [43, 44]. Z punktu widzenia fizjograficznego czynnikami tymi są: położenie geograficzne, warunki klimatyczne i szata roślinna. Klimat, a precyzyjniej – bilans ciepła i wilgoci, wpływa na skład szaty roślinnej – potencjalnego materiału palnego. Zagrożenie pożarowe lasów kształtują następujące czynniki:

- możliwości pojawienia się zarzewia ognia zdolnego do zapalenia pokrywy gleby,
- rodzaj materiałów palnych, znajdujących się w miejscu pojawienia się zarzewia ognia, ich ilość i rozmieszczenie na powierzchniach leśnych, bądź w ich sąsiedztwie,
- warunki meteorologiczne determinujące wilgotność pokrywy gleby i innych materiałów znajdujących się w lesie oraz wilgotność powietrza.

Pierwszy z wymienionych czynników ma kluczowe znaczenie, ponieważ pomimo zaistnienia warunków sprzyjających powstaniu pożaru ogień nie pojawi się jeżeli nie będzie zarzewia ognia.

O zagrożeniu pożarowym lasów decydują:

- pora roku (zwłaszcza występowanie pokrywy śnieżnej),
- wiek i skład gatunkowy drzewostanów oraz rodzaj pokrywy gleby,
- intensywność zabiegów gospodarczych w lesie oraz sposób wykorzystania (użytkowania) drzewostanów,
- sieć dróg komunikacyjnych oraz nasilenie ruchu na tych drogach,
- atrakcyjność turystyczno – wypoczynkowa i obfitość płodów runa leśnego,
- rozmieszczenie osad ludzkich wśród i na obrzeżach lasów,
- inne warunki lokalne (np. poligony, zakłady przemysłowe).

W okresie wiosennym (zanik pokrywy śnieżnej) podatne na zapalenia są lasy, w których występuje znaczne nagromadzenie materii palnej, takich jak: sucha roślinność dna lasu, opadłe listowie, chrust. Na zagrożenie pożarowe rzutuje również sąsiedztwo nieużytków, łąk, pastwisk itp.

W miarę rozwoju roślin runa leśnego, zagrożenie pożarowe maleje ze względu na zwiększanie się zawartości wody w biomacie.

Miesiące letnie charakteryzują się dużym zagrożeniem pożarowym ze względu na duże nasłonecznienie – następuje zamieranie i usychanie roślin runa leśnego (głównie traw). W okresie tym istotnym czynnikiem jest również długość dnia.

Okres jesienny charakteryzuje się mniejszym zagrożeniem pożarowym, ze względu na niższe temperatury i wyższą wilgotność powietrza.

Istotnym czynnikiem kształtującym zagrożenie pożarowe w poszczególnych porach roku są warunki meteorologiczne. Od nich przede wszystkim zależy ukształtowanie podatności na zapalenie materiałów palnych znajdujących się w lesie i jego sąsiedztwie. Zasadnicze znaczenie mają:

- opady meteorologiczne,
- temperatura powietrza,
- wilgotność powietrza,
- prędkość i kierunek wiatru,
- zmiany kierunku wiatru,
- natężenie promieniowania słonecznego,
- zachmurzenie.

Ostatni z wymienionych czynników wpływa na możliwość wykrycia pożaru w początkowej fazie jego rozwoju.

Na zagrożenie pożarowe wpływa również działalność człowieka, który według statystyk, jest sprawcą przeważającej części pożarów (Tabela 2.1 i 2.2).

Požary lasów są zjawiskami na tyle powszechnymi, iż proponowana w pracy metoda gaszenia pożarów aerozolem wodnym wydaje się być w pełni uzasadniona. Dotyczy to zarówno Polski jak i zdecydowanej większości krajów zarówno Europy jak i całego świata. W tabelach od 2.3 do 2.7 oraz na rysunkach od 2.1 do 2.4 zebrane są dane statystyczne dotyczące występowania pożarów lasów w Polsce i innych krajach.

ZAŁĄCZNIK NR 1

Lp.	Przyczyna	1991-1995		1996		1997		1998	
		Ilość	Pow. spalona [ha]	Ilość	Pow. spalona [ha]	Ilość	Pow. spalona [ha]	Ilość	Pow. spalona [ha]
1	Podpalenia	6832	7607,6	1153	1422,4	1227	710,1	1309	644,2
2	Nieostrożność nieletnich	451	215,4	78	51,6	61	31,6	58	17,7
3	Nieostrożność dorosłych	8508	6724,5	886	643,5	688	292,1	735	220,9
4	Wyładowania atmosferyczne	314	113,2	22	3,2	15	5,6	54	23,4
5	Wady urządzeń technicznych	224	153,8	28	11,4	35	53,8	35	9,1
6	Transport drogowy	125	63,2	19	5,3	17	2,2	13	2,7
7	Transport kolejowy	681	14883,0	99	333,1	46	27,5	36	5,5
8	Przerzuty z gruntów nieleśnych	1346	2153,4	1265	1968,5	656	598,5	270	148,2
9	Pozostałe	364	232,0	45	38,2	43	12,0	53	15,7
10	Nieustalone	7184	11219,0	951	837,4	836	439,2	843	361,7
	Razem	26029	43365,1	4546	5314,5	3624	2172,5	3406	1449,2

Tabela 2.1. Pożary lasów powstałe w Polsce w latach 1991-1998 według przyczyn powstania (dotyczy Lasów Państwowych) [43]

ZAŁĄCZNIK NR 1

POŻARY LASÓW WEDŁUG PRZYCZYN POWSTANIA										
L A T A a – w liczbach bezwzględnych (liczba – w sztukach; powie- rzchnia – w hektarach) b – w odsetkach	Ogółem	Według przyczyn								
		podpa- lenie	nieostrożność		wyłado- wania atmosfe- ryczne	wady urządzeń techni- cznych i ich niepra- widłowa eksploa- tacja	wady środków transpor- tu i ich niepra- widłowa eksploa- tacja	pozosta- łe	nieusta- lone	
			nietle- nich	doro- słych						
LICZBA POŻARÓW										
1996	a	7523	3441	365	2991	25	38	25	137	501
	b	100,0	45,7	4,9	39,8	0,3	0,5	0,3	1,8	6,7
1997	a	6528	3029	225	2567	19	43	12	156	477
	b	100,0	46,4	3,4	39,3	0,3	0,6	0,2	2,4	7,3
1998	a	5946	2734	166	2263	49	40	11	142	541
	b	100,0	46,0	2,8	38,0	0,8	0,7	0,2	2,4	9,1
1999	a	9405	4039	297	3827	26	55	12	359	790
	b	100,0	42,9	3,2	40,7	0,3	0,6	0,1	3,8	8,4
2000	a	12428	5867	280	4713	64	61	29	353	1061
	b	100,0	47,2	2,3	37,9	0,5	0,5	0,2	2,9	8,5
2001	a	4480	2192	99	1755	15	21	3	83	312
	b	100,0	48,9	2,2	39,2	0,3	0,5	0,1	1,8	7,0
2002	a	10101	4914	201	3849	41	45	7	271	773
	b	100,0	48,6	2,0	38,1	0,4	0,4	0,1	2,7	7,7
2003	a	17088	8576	230	6119	67	69	20	465	1542
	b	100,0	50,2	1,3	35,8	0,4	0,4	0,1	2,7	9,0
2004	a	7006	3550	110	2520	19	29	5	240	533
	b	100,0	50,7	1,6	35,9	0,3	0,4	0,1	3,4	7,6
2005	a	12169	6492	148	4161	33	40	13	419	863
	b	100,0	53,4	1,2	34,2	0,3	0,3	0,1	3,4	7,1

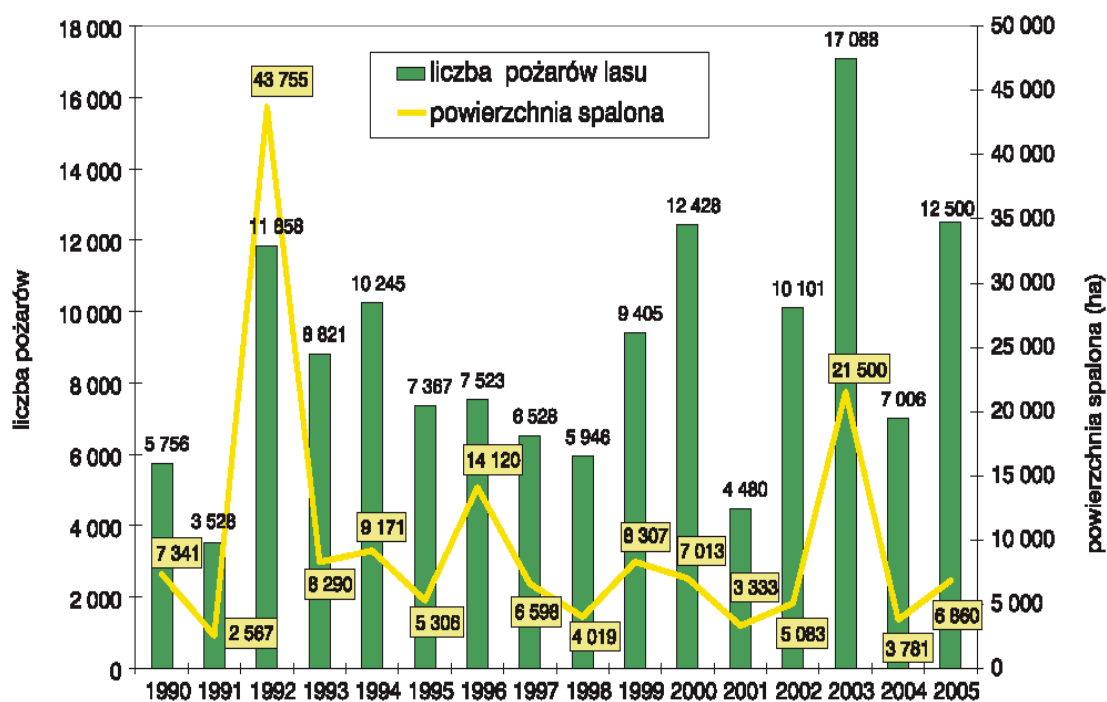
Tabela 2.2. Pożary lasów powstałe w Polsce w latach 1996-2005 według przyczyn powstania [45]

Średnie wartości statystyczne dotyczące pożarów lasów w Polsce w latach 1981 - 2002			
Lata	Liczba pożarów lasów	Powierzchnia spalona [ha]	Powierzchnia średnia jednego pożaru [ha]
Okresy 5-letnie			
1981 - 1985	2799	4469	1,6
1986 - 1990	3419	4389	1,28
1991 - 1995	8364	13818	1,65
1996 - 2000	8366	8011	0,96
Okresy 10-letnie			
1981 - 1990	3109	4429	1,42
1989 - 1998	7110	10616	1,49
1990 - 1999	7698	10947	1,42
1991 - 2000	8365	10915	1,3

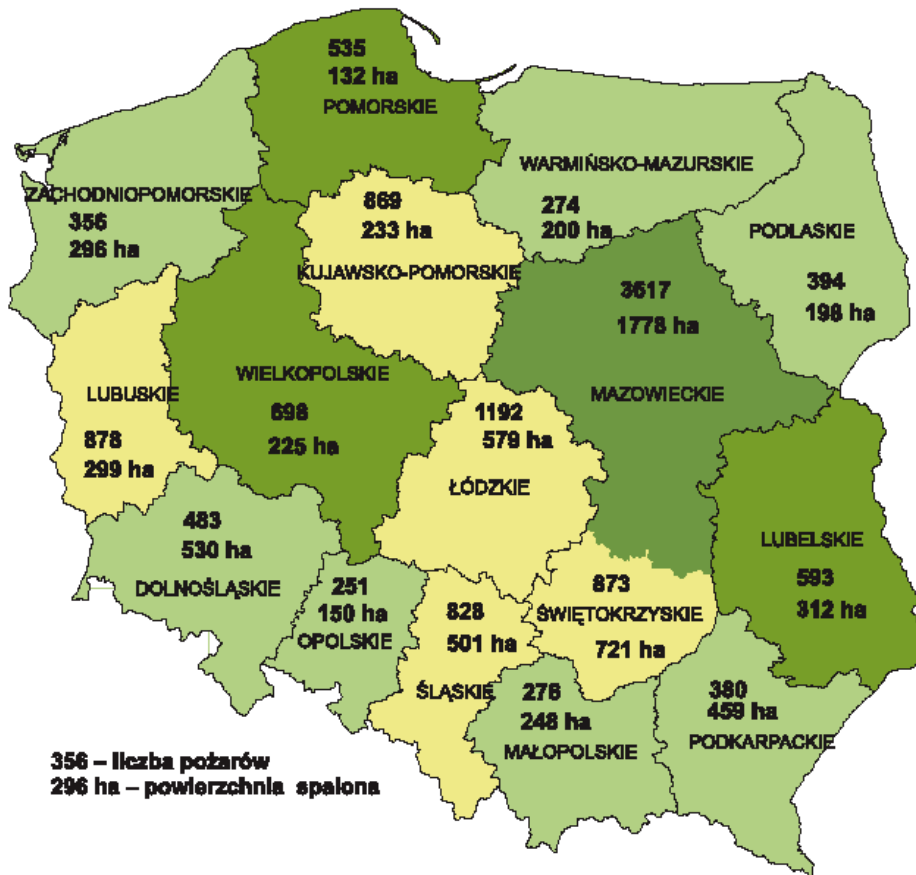
Tabela 2.3. Liczba pożarów, powierzchnia spalona lasów oraz powierzchnia przeciętna jednego pożaru w Polsce w latach 1990 – 2002, średnie wartości statystyczne w okresach 5-letnich i 10-letnich [45]

Rok	Liczba pożarów	Powierzchnia lasów dotknięta pożarami [ha]	Powierzchnia przeciętna jednego pożaru [ha]
1995	7681	5403	0,7
1996	7523	14120	1,88
1997	6528	6598	1,01
1998	5946	4019	0,68
1999	9405	8307	0,88
2000	12428	7013	0,56
2001	4480	4329	0,77
2002	10101	5200	0,51
2003	17088	21500	1,26
2004	7006	3781	0,55
2005	12169	5826	0,48

Tabela 2.4. Liczba pożarów, powierzchnia spalona lasów oraz powierzchnia przeciętna jednego pożaru w Polsce w latach 1990 - 2005 [45]



Rysunek 2.1. Liczba pożarów i powierzchnia spalona lasów w Polsce w latach 1990 - 2005 [46]



Rysunek 2.2. Liczba pożarów i powierzchnia spalona lasów w Polsce w roku 2005 dla poszczególnych województw [46]

ZAŁĄCZNIK NR 1

Kraj	1991	1992	1993	1994
Albania	147	695	560	585
Austria	78	165	178	94
Belgia	65	26	36	42
Bułgaria	73	602	1196	24
Cypr	47	18	16	35
Czechy	961	2586	1951	1833
Dania	-	2	1	1
Finlandia	287	852	570	570
Francja	3888	4008	4796	4747
Grecja	858	2582	2546	2325
Hiszpania	13011	15895	14241	19215
Irlandia	194	156	123	158
Izrael	1170	1170	1170	1170
Kanada	10334	9069	5846	8416
Litwa	147	1154	635	714
Luksemburg	11	8	12	6
Łotwa	1110	1510	965	854
Mołdawia	18	14	1	33
Niemcy	1846	3012	1694	1696
Norwegia	976	892	253	471
Polska	3489	11493	8672	10710
Portugalia	13118	14954	16101	21432
Rosja	17965	25777	18428	20723
Rumunia	44	187	160	121
Słowenia	66	113	211	66
Szwajcaria	157	111	99	54
Turcja	1445	2110	2547	3221
USA	150118	176536	153023	153023
Węgry	393	393	393	393
Włochy	11965	14545	15380	8655
Wielka Brytania	475	328	328	328

Tabela 2.5. Liczba pożarów leśnych w latach 1991-1994 w wybranych krajach [43]

ZAŁĄCZNIK NR 1

Kraj	1991	1992	1993	1994
Albania	250	1011	522	705
Austria	53	132	112	57
Belgia	54	16	107	59
Bułgaria	511	5243	18164	7973
Cypr	108	9	69	178
Czechy	76	1278	1155	836
Dania	-	277	138	138
Finlandia	226	1082	580	580
Francja	10130	16605	16695	24460
Grecja	13046	71410	48800	60632
Hiszpania	244706	104592	89267	432252
Irlandia	667	569	540	592
Izrael	8927	8927	8927	8927
Kanada	1566910	868763	1967388	1467687
Litwa	54	863	304	301
Luksemburg	4	2	7	2
Łotwa	3096	8366	571	350
Mołdawia	20	22	2	215
Niemcy	920	4908	1493	1114
Norwegia	530	1370	224	232
Polska	2170	33334	8094	9325
Portugalia	182486	59071	49963	39146
Rosja	1126222	1142775	1200435	1156477
Rumunia	277	730	545	311
Słowenia	713	530	1863	912
Szwajcaria	148	52	42	293
Turcja	7642	12312	13734	20997
USA	1114464	1283338	1831195	1409666
Węgry	1349	1349	1349	1349
Włochy	99860	105695	20343	119414
Wielka Brytania	114	194	123	144

Tabela 2.6. Powierzchnia pożarów leśnych (ha) w latach 1991-1994 w wybranych krajach [43]

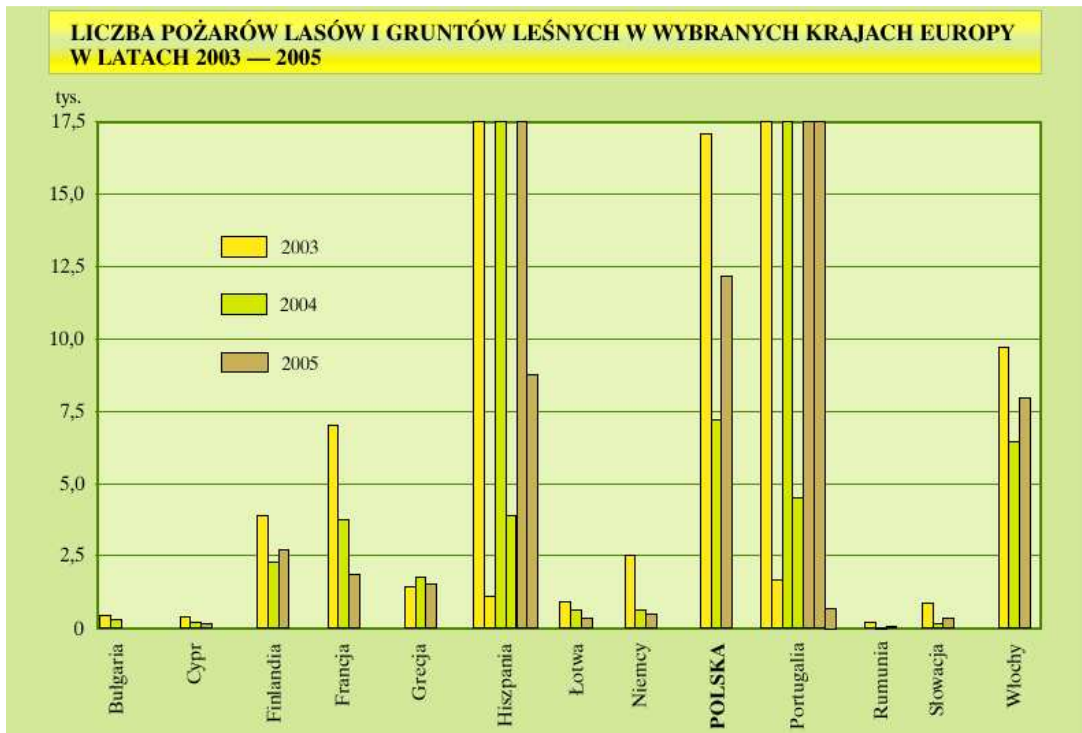
ZAŁĄCZNIK NR 1

LICZBA POŻARÓW LASÓW I GRUNTÓW LEŚNYCH W WYBRANYCH KRAJACH EUROPY											
KRAJE	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Bułgaria	114	246	200	578	320	1710	825	402	452	294	.
Cypr .....	.	.	.	.	.	285	299	243	427	221	185
Finlandia .....	.	1475	1585	370	1528	826	822	2512	3902	2270	2696
Francja	6545	6400	8000	6289	4960	4603	4309	4097	7023	3767	1871 ^{a)}
Grecja	1438	1508	2273	1842	1486	2581	2535	1141	1452	1748	1544
Hiszpania	25828	16771	22320	22448	18237	24118	19099	19929	18616	21396	26261 ^{b)}
Łotwa	582	1095	768	357	1196	915	272	1720	900	647	365
Niemcy	1237	1748	1467	1032	1178	1210	587	513	2524	626	496
P o l s k a	7681	7523	6528	5946	9405	12428	4480	10101	17088	7006	12169
Portugalia	34116	28626	23497	34676	25477	34109	26942	26488	20864	21970	35698
Rumunia	62	72	37	59	138	688	268	516	203	34	64
Słowacja	254	662	535	1056	426	824	311	570	872	153	362
Włochy	7378	9093	11612	10155	7235	10629	7134	4594	9697	6428	7951

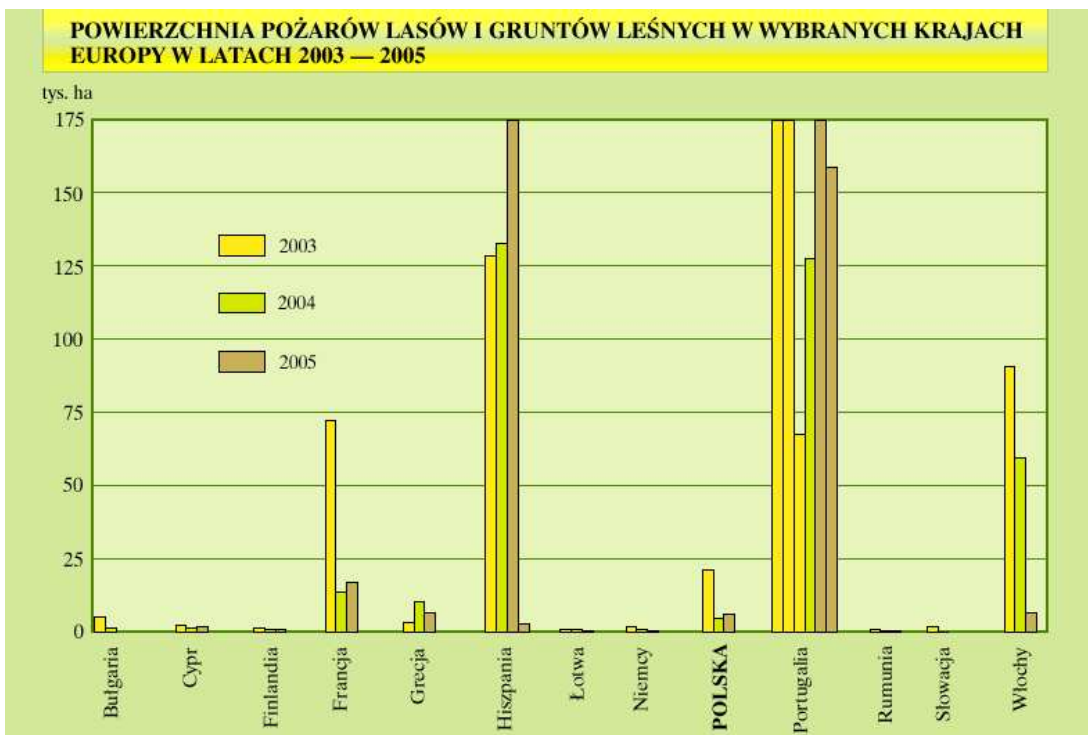
Tabela 2.7. Liczba pożarów lasów i gruntów leśnych w wybranych krajach Europy w latach 1995 – 2005 [45]

POWIERZCHNIA POŻARÓW LASÓW I GRUNTÓW LEŚNYCH W WYBRANYCH KRAJACH EUROPY											
KRAJE	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
	w hektarach										
Bułgaria	550	2150	595	6967	8291	57406	20152	6513	5000	1137	.
Cypr .....	.	.	.	.	.	8034	4830	2196	2349	1218	1838
Finlandia .....	.	433	1146	131	609	355	179	573	1359	735	1068
Francja	18118	11210	20500	19282	15906	24078	20642	30159	73275	13709	17356 ^{a)}
Grecja	27202	25310	52373	92901	8289	145033	18221	6013	3517	10267	6437
Hiszpania	143468	59814	98503	133643	82217	188586	66075	107472	130069	134193	179929 ^{b)}
Łotwa	535	927	448	211	1544	1341	311	2222	559	428	121
Niemcy	592	1381	599	397	415	581	122	122	1315	274	183
P o l s k a	5403	14120	6598	4019	8307	7013	3429	5200	21500	3781	5826
Portugalia	169612	88867	30534	158369	70613	159604	112158	124411	421835	128937	338262
Rumunia	208	227	68	137	379	3607	1001	3536	762	124	162
Słowacja .....	.	.	.	.	557	904	305	595	1567	157	.
Włochy	46466	57986	103015	140432	61989	114648	76427	40768	91803	60179	6428

Tabela 2.8. Powierzchnia pożarów lasów i gruntów leśnych w wybranych krajach Europy w latach 1995 – 2005 [45]



Rysunek 2.3. Liczba pożarów lasów i gruntów leśnych w wybranych krajach Europy w latach 2003 – 2005 [45]



Rysunek 2.4. Powierzchnia pożarów lasów i gruntów leśnych w wybranych krajach Europy w latach 2003 – 2005 [45].

Załącznik nr 2

WYZNACZENIE BŁĘDU POMIARU ŚREDNICY CHMURY AEROZOLU WODNEGO

W pomiarze średnicy chmury aerozolu wodnego uwzględniono występowanie następujących rodzajów błędów:

- 1) Błąd związany z usytuowaniem punktu odniesienia,
- 2) Błąd wynikający z niejednoznacznego określenia zasięgu chmury aerozolu wodnego,
- 3) Błąd uwzględniający rozdzielczość rejestrowanego przez kamerę obrazu,
- 4) Błąd uwzględniający wpływ wiatru na rozprzestrzenianie się chmury aerozolu wodnego.

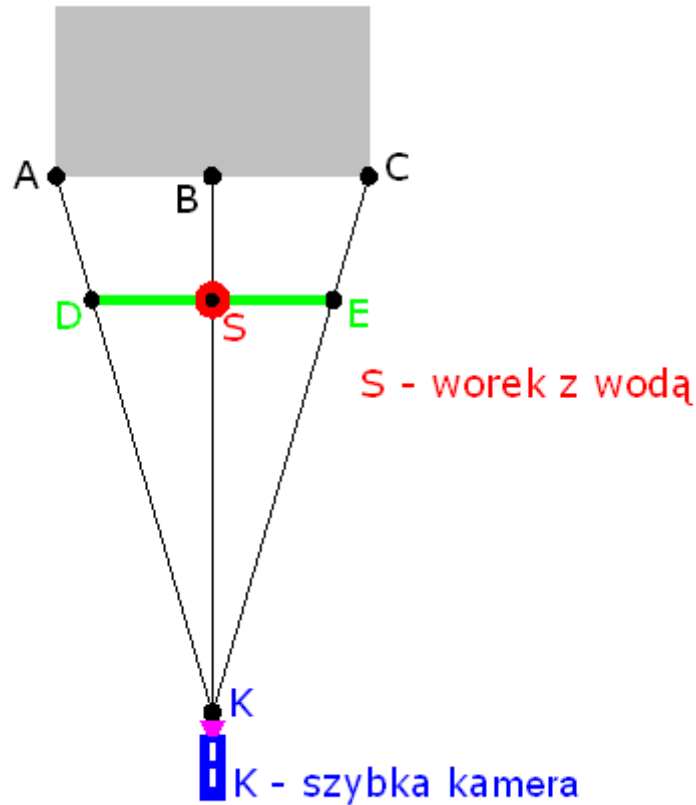
Ad 1) Błąd związany z usytuowaniem punktu odniesienia

Stanowisko badawcze przedstawione jest na Rysunku Z.2.1. Punktem odniesienia, do badania średnicy chmury aerozolu wodnego, jest budynek znajdujący się za kapsułą wodną. Jego szerokość pozwala na wyskalowanie programu służącego do wyznaczenia średnicy chmury.



Rysunek Z.2.1. Stanowisko do pomiaru średnicy chmury aerozolu wodnego. Punktem odniesienia do określenia średnicy chmury jest szerokość budynku za kapsułą wodną

W celu określenia średnicy chmury aerozolu wodnego konieczne jest wprowadzenie poprawki uwzględniającej usytuowanie budynku za kapsułą wodną. Rzut poziomy stanowiska badawczego przedstawiony jest na Rysunku Z.2.2.



Rysunek Z.2.2. Rzut poziomy stanowiska do pomiaru średnicy chmury aerozolu wodnego (szare pole to budynek służący jako punkt odniesienia od pomiaru odległości)

Aby określić średnicę chmury aerozolu nie można przyjąć następującego założenia (Rysunek Z.2.2)

$$|DE| = |AC|. \quad (Z2.1)$$

Wyskalowanie programu określającego średnicę polega na uznaniu prawdziwości równania (Z2.1). W związku z czym konieczne jest wprowadzenie poprawki, której oszacowanie przedstawione jest poniżej.

Korekta wyznaczenia średnicy polega na wyznaczeniu stałej a w poniższym równaniu

$$D(t) = a \cdot D^*(t), \quad (Z2.2)$$

gdzie:

$D(t)$ - średnica rzeczywista chmury aerozolu wodnego,

$D^*(t)$ - wynik odczytu średnicy chmury aerozolu wodnego wynikający z przyjęcia równania (Z2.1).

Zatem

$$a = \frac{D(t)}{D^*(t)}. \quad (Z2.3)$$

Powyższa stała może być obliczona w oparciu o znajomość długości odcinków $|DE|$ i $|AC|$:

$$D(t_x) = |DE| \text{ oraz } D^*(t_x) = |AC|. \quad (Z2.4)$$

Korzystając z podobieństwa trójkątów ABK i DEK (Rysunek Z.2.2) otrzymuje się

$$\frac{|AC|}{|BK|} = \frac{|DE|}{|SK|}, \quad (Z2.5)$$

skąd

$$|DE| = \frac{|AC| \cdot |SK|}{|BK|}. \quad (Z2.6)$$

Po wstawieniu równań (Z2.6) i (Z2.4) do (Z2.3) otrzymuje się

$$a = \frac{|AC| \cdot |SK|}{|AC| \cdot |BK|} \quad (Z2.7)$$

skąd

$$a = \frac{|SK|}{|BK|} \quad (Z2.8)$$

Dla następujących danych

$$\begin{cases} |AC| = 12,4 \pm 0,1 \text{ m} \\ |SK| = 142 \pm 2 \text{ m} \\ |BK| = 159 \pm 2 \text{ m} \end{cases}, \quad (Z2.9)$$

otrzymuje się

$$a = 0,893 \pm 0,001, \quad (Z2.10)$$

oraz

$$\Delta D = 0,001 \cdot D. \quad (Z2.11)$$

Błąd wyznaczenia stałej a wynosi 0,1% średnicy chmury, co przy odległościach rzędu 50 m przekłada się na 0,05 m.

Ad 2) Błąd wynikający z niejednoznacznego określenia zasięgu chmury aerozolu wodnego

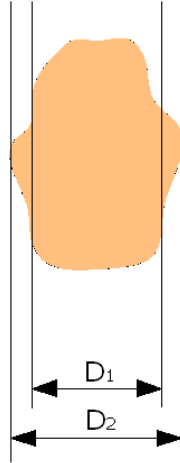
Rozprzestrzeniająca się chmura aerozolu wodnego przyjmuje różne nieregularne kształty i pomiar jej średnicy obarczony jest pewnym błędem. Błąd ten jest najmniejszy w początkowych chwilach ekspansji i sukcesywnie zwiększa się w miarę wzrostu średnicy aerozolu. Obrazowo przedstawione jest to na Rysunku Z.2.3 i Rysunku Z.2.4. Właściwa wartość średnicy D spełnia równanie

$$D_1 \leq D \leq D_2, \quad (Z2.12)$$

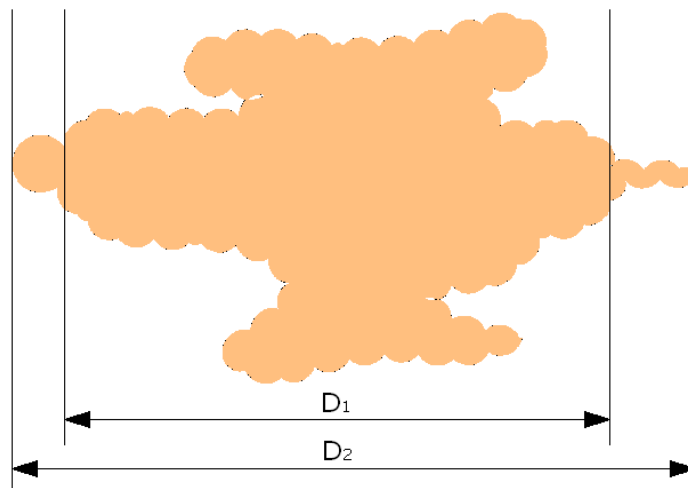
gdzie D_1 i D_2 to średnice chmury aerozolu wyznaczone zgodnie z Rysunkiem Z.2.3 i Rysunkiem Z.2.4.

Błąd wyznaczenia średnicy chmury aerozolu definiuje się jako

$$\Delta D = D_2 - D_1. \quad (Z2.13)$$



Rysunek Z.2.3. Pomiar średnicy chmury aerozolu wodnego – początkowe chwile ekspansji (opis w tekście)



Rysunek Z.2.4. Pomiar średnicy chmury aerozolu wodnego (opis w tekście)

Na podstawie analizy wielu doświadczeń ustalono, że błąd odczytu średnicy chmury aerozolu wodnego można uzależnić od czasu rozprzestrzeniania się chmury. Wyniki zestawione są w Tabeli Z.2.1.

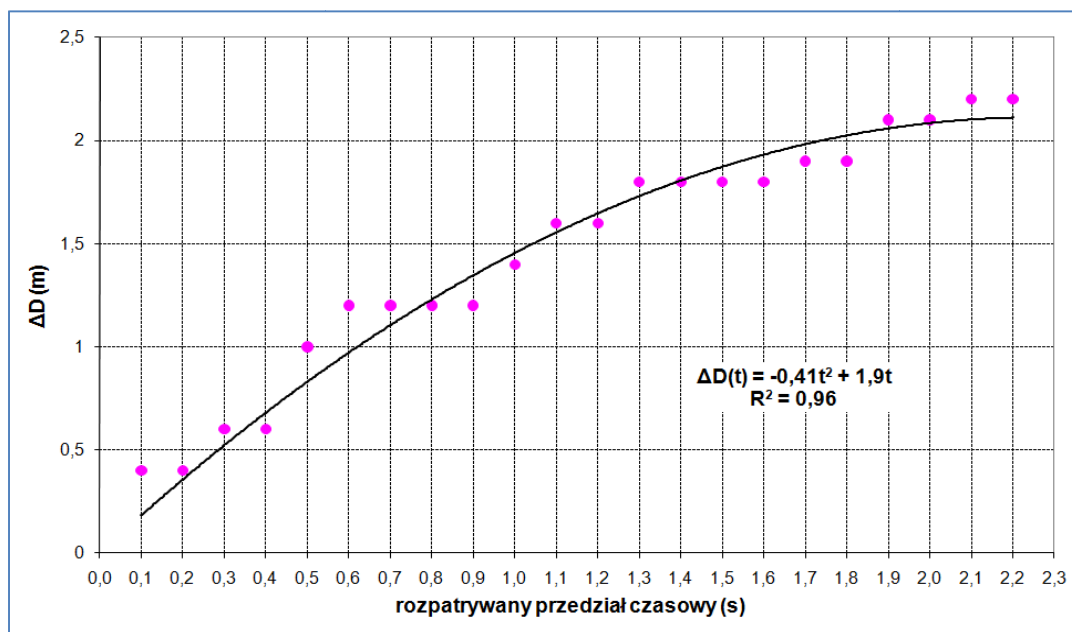
Tabela Z.2.1. Błąd odczytu średnicy chmury aerozolu wodnego (zdefiniowany równaniem (Z2.13)) w zależności od czasu rozprzestrzeniania się chmury

Rozpatrywany przedział czasowy (s)				ΔD (m)
od	0,0	do	0,1	0,4
od	0,1	do	0,2	0,4
od	0,2	do	0,3	0,6
od	0,3	do	0,4	0,6
od	0,4	do	0,5	1
od	0,5	do	0,6	1,2
od	0,6	do	0,7	1,2
od	0,7	do	0,8	1,2
od	0,8	do	0,9	1,2
od	0,9	do	1,0	1,4
od	1,0	do	1,1	1,6
od	1,1	do	1,2	1,6
od	1,2	do	1,3	1,8
od	1,3	do	1,4	1,8
od	1,4	do	1,5	1,8
od	1,5	do	1,6	1,8
od	1,6	do	1,7	1,9
od	1,7	do	1,8	1,9
od	1,8	do	1,9	2,1
od	1,9	do	2,0	2,1
od	2,0	do	2,1	2,2
od	2,1	do	2,2	2,2

Ponieważ ΔD nie jest funkcją dyskretną, przyjęto arbitralnie, że jest on funkcją kwadratową czasu rozprzestrzeniania się chmury aerozolu

$$\Delta D(t) = c_1 \cdot t^2 + c_2 \cdot t + c_3. \quad (Z2.14)$$

Stałe c_1, c_2, c_3 wyznaczono aproksymując funkcję kwadratową (metoda najmniejszych kwadratów) do danych przedstawionych w Tabeli Z.2.1. Wynik dopasowania przedstawiony jest na Rysunku Z.2.5. Dopasowanie charakteryzuje się bardzo wysokim współczynnikiem determinacji R^2 (wartość na Rysunku Z.2.5).



Rysunek Z.2.5. Ustalenie funkcji określającej błąd odczytu średnicy chmury aerozolu wodnego -dopasowanie funkcji kwadratowej do danych zawartych w Tabeli Z.2.1

Błąd wyznaczenia średnicy chmury aerozolu wodnego wynosi

$$\Delta D(t) = -0,41 \cdot t^2 + 1,87 \cdot t. \quad (\text{Z2.15})$$

Ad 3) Błąd uwzględniający rozdzielczość rejestrowanego przez kamerę obrazu

Do rejestracji rozprzestrzeniania się chmury aerozolu wodnego użyta została szybka kamera FASTCAM 1024 pracująca z rozdzielczością czasową 250 fps oraz nagrywająca obraz z rozdzielczością 1024x1024 dpi. W związku z takim trybem pracy kamery błąd ustalenia czasu każdej klatki filmu można przyjąć na poziomie

$$\Delta t = 0,004 \text{ s}, \quad (\text{Z2.16})$$

natomiast błąd wyznaczenia odległości to

$$\Delta x = \Delta D = 2 \cdot \frac{50 \text{ m}}{1024} = 0,1 \text{ m}. \quad (\text{Z2.17})$$

Wartość 50 m występująca w powyższym wzorze to maksymalna szerokość rejestrowana przez obiektyw kamery (kamera rejestrowała wycinek powierzchni o rozmiarach 50 x 50 m).

Ad 4) Błąd uwzględniający wpływ wiatru na rozprzestrzenianie się chmury aerozolu wodnego

Wiejący wiatr ma wpływ na rozprzestrzenianie się chmury aerozolu wodnego. Podczas prób jego kierunek był prostopadły do osi kamera – kapsuła wodna, w związku z czym w znaczący sposób zmieniał on kształt chmury aerozolu wodnego. Objawiało się to w niesymetrycznym kształcie chmury – zwiększenie zasięgu w kierunku wiejącego wiatru. Wpływ wiatru w początkowych chwilach ekspansji chmury aerozolu wodnego jest znikomo mały ze względu na rozprzestrzenianie się czoła fali uderzeniowej, której prędkość jest zbliżona do prędkości dźwięku w powietrzu.

Nie jest możliwe ustalenie ilościowej poprawki określającej wpływu wiatru na zasięg chmury aerozolu wodnego, w związku z czym należy podczas analizy zgromadzonego materiału uwzględniać ten fakt. Dotyczy to zwłaszcza czasów przekraczających 0,4 s od chwili detonacji głównego materiału wybuchowego umieszczonego w kapsule wodnej.

Całkowity błąd pomiaru średnicy chmury aerozolu wodnego

Na podstawie błędów cząstkowych - równania (Z2.11), (Z2.15), (Z2.17) otrzymuje się błąd całkowity pomiaru średnicy chmury aerozolu wodnego z zastrzeżeniem, że dla czasów ekspansji chmury przekraczających 0,4 s uwidacznia się wpływ wiatru

$$\Delta D = 0,001 \cdot D - 0,41 \left(\frac{m}{s^2} \right) \cdot t^2 + 1,87 \left(\frac{m}{s} \right) \cdot t + 0,1, \quad (Z2.18)$$

gdzie: [D] = m oraz [t] = s.

Załącznik nr 3

WYZNACZENIE BŁĘDU PRĘDKOŚCI CHWILOWEJ ROZPRZESTRZENIANIA SIĘ CHMURY AEROZOLU WODNEGO

Wyznaczona doświadczalnie zależność średnicy chmury aerozolu wodnego w funkcji czasu rozprzestrzeniania ($D(t)$) pozwala na obliczenie prędkości chwilowej (v_{ch}). Oszacowanie to wykonano na podstawie dopasowanej funkcji, która możliwie najlepiej aproksymowała zależność $D(t)$. Jako funkcję aproksymującą przyjęto wielomian szóstego stopnia. Wybór ten podyktowany jest otrzymanym współczynnikiem dopasowania – współczynnik determinacji na poziomie 1,0000.

Dla wielomianu

$$D(t) = at^6 + bt^5 + ct^4 + dt^3 + et^2 + ft + g, \quad (Z3.1)$$

prędkość chwilowa wynosi

$$v_{ch} = \frac{dD(t)}{dt} = 6at^5 + 5bt^4 + 4ct^3 + 3dt^2 + 2et + f. \quad (Z3.2)$$

Błąd wyznaczenia prędkości chwilowej związany jest z niedokładnością odczytu czasu i średnicy chmury aerozolu:

$$v_{ch} = v_{ch}(D, t). \quad (Z3.3)$$

Korzystając z metody różniczki zupełnej otrzymuje się błąd pomiaru [56, 60]

$$\Delta v_{ch} = \left| \frac{\partial v_{ch}(D, t)}{\partial D} \right| \cdot \Delta D + \left| \frac{\partial v_{ch}(D, t)}{\partial t} \right| \cdot \Delta t. \quad (Z3.4)$$

Wartości błędów ΔD i Δt oszacowane zostały w Załączniku 2 (równania (Z2.16) oraz (Z2.18)) i wynoszą:

$$\begin{cases} \Delta D = (0,001 \cdot D - 0,41 \cdot t^2 + 1,87 \cdot t + 0,1) \text{ m} \\ \Delta t = 0,004 \text{ s} \end{cases} \quad (\text{Z3.5})$$

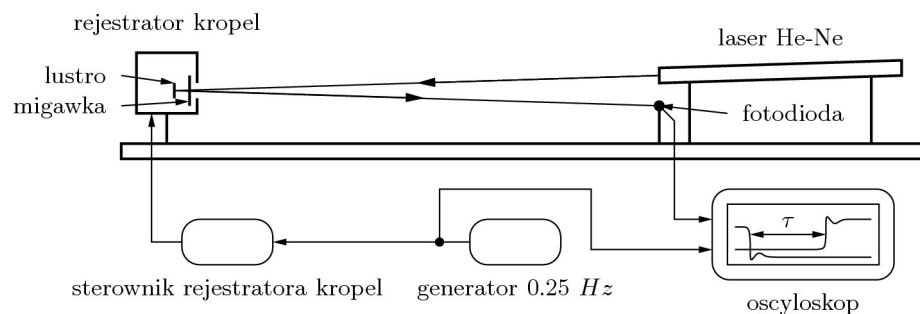
Po uwzględnieniu (Z3.5) równanie (Z3.4) przyjmuje postać

$$\Delta v_{ch} = \left(\frac{1}{D} \cdot (0,001 \cdot D - 0,41 \cdot t^2 + 1,87 \cdot t + 0,1) + \frac{D}{t^2} \cdot 0,004 \right) \text{ m/s}. \quad (\text{Z3.6})$$

ZAŁĄCZNIK NR 4

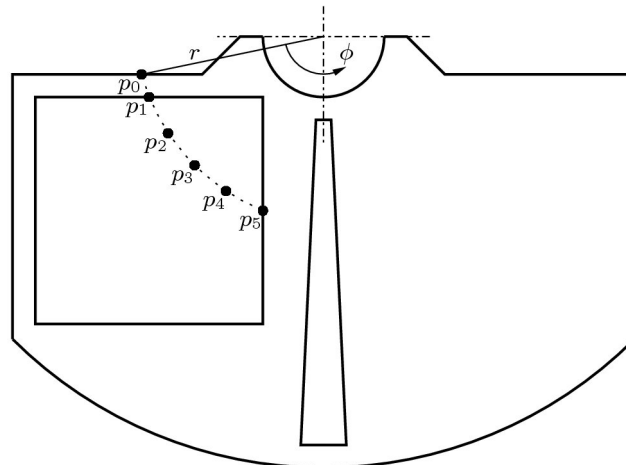
WYZNACZENIE PARAMETRÓW MIGAWKI REJESTRATORA KROPEL

Celem tego eksperymentu było wyznaczenie zależności kąta otwarcia migawki ϕ od czasu t , który upłynął od momentu wyzwolenia. Rysunek Z.4.1 przedstawia schemat blokowy stanowiska pomiarowego. Przy zamkniętej migawce promień lasera jest rozpraszany i fotodioda pozostaje nieoświetlona. Po wyzwoleniu (zbcze opadające z generatora 0,25 Hz) rozpoczyna się proces otwierania migawki i w momencie jej otwarcia do punktu, na który został skierowany promień lasera na wyjściu fotodiody pojawia się sygnał wysoki. Fotodioda zostaje oświetlona odbitym od lustra promieniem lasera. Oscyloskop rejestruje histogram odcinków czasu pomiędzy opadającym zboczem wyzwalającym a narastającym zboczem odpowiedzi fotodiody.



Rysunek Z.4.1. Schemat blokowy stanowiska do wyznaczenia czasu otwarcia τ migawki rejestratora

Na część widoczną (przy zamknięciu) migawki rejestratora naniesiono w równych odległościach kątowych pięć punktów $p_1 \div p_5$ (Rysunek Z.4.2). Dodatkowy punkt p_0 symbolizuje krawędź migawki i został on naniesiony w celu wyznaczenia położenia początkowego. Jeżeli przykładowo promień lasera został skierowany na punkt p_1 to po wyzwoleniu przesunięcie punktu p_0 na pozycję punktu p_1 spowoduje odświeżenie lustra i oświetlenie fotodiody.

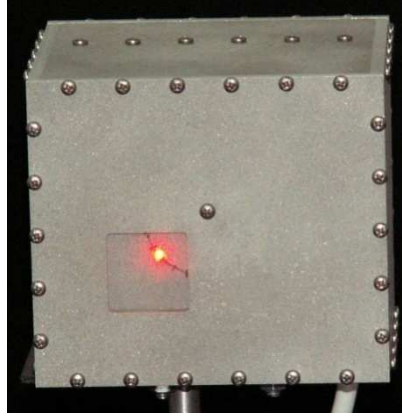


Rysunek Z.4.2. Rozmieszczenie punktów pomiarowych na migawce rejestratora

Odległości l_{i+1} pomiędzy parami sąsiednich punktów p_i oraz p_{i+1} , $i \in \{0,5\}$ zostały zmierzone i na ich podstawie wyznaczone zostaną kąty otwarcia. Odległości te wynoszą kolejno $l_1 = 4.5 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ oraz $l_j = 6 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$, $j \in \{2,5\}$. Promień okręgu r na którym zostały rozmieszczone punkty wynosi $24 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$. Oczywiście środek tego okręgu przypada w osi obrotu migawki. Rysunki Z.4.3 oraz Z.4.4 przedstawiają fotografie stanowiska laboratoryjnego oraz czołowej ściany rejestratora wraz z zamkniętą migawką, na której naniesiono punkty $p_1 \div p_5$.



Rysunek Z.4.3. Fotografia stanowiska do wyznaczania czasu otwarcia migawki rejestratora



Rysunek Z.4.4. Fotografia płyty czołowej rejestratora kropel

Kąty α_{i+1} pomiędzy parami punktów p_i oraz p_{i+1} , $i \in \{0,4\}$ wynoszą

$$\alpha_i = 2 \arcsin\left(\frac{l_i}{2r}\right), \quad i \in \{1,5\}. \quad (\text{Z4.1})$$

Po podstawieniu wartości liczbowych otrzymuje się $\alpha_1=10.76^\circ$ oraz $\alpha_5=14.36^\circ$, $i \in \{2,5\}$.

Błędy $\Delta\alpha_i$ wyznaczenia kątów α_i policzono z różniczki zupełnej, przy czym założono, że błędy pomiarów długości promienia oraz błędy pomiarów odległości pomiędzy punktami są niezależne, co daje

$$\Delta\alpha_i = \sqrt{\left(\frac{\partial}{\partial l}(\alpha(l,r))\Big|_{l=l_i} \Delta l\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial r}(\alpha(l,r))\Big|_{l=l_i} \Delta r\right)^2}. \quad (\text{Z4.2})$$

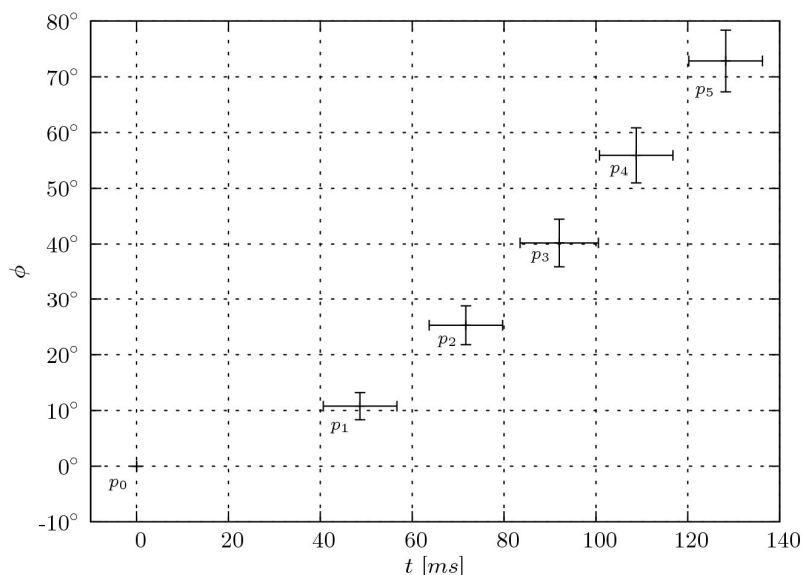
Po podstawieniu wartości liczbowych otrzymuje się dwie wartości błędów wyznaczenia kątów pomiędzy parami punktów $\Delta\alpha_1=2.4^\circ$ oraz $\Delta\alpha_5=2.5^\circ$, $i \in \{2,5\}$.

Kąt ϕ_i względem punktu p_0 dla punktu p_i będzie stanowił sumę kątów dla par punktów poprzedzających

$$\phi_i = \sum_{j=1}^i \alpha_j. \quad (\text{Z4.3})$$

Błąd $\Delta\phi_1$ wyznaczenia kąta ϕ_1 wynosi $\Delta\alpha_1$, natomiast błędy $\Delta\phi_i$, $i \in \{2,5\}$ wyznaczenia kątów ϕ_i policzono jako błędy sumy i wynoszą one kolejno $\Delta\phi_2=3.5^\circ$, $\Delta\phi_3=4.3^\circ$, $\Delta\phi_4=5.0^\circ$, $\Delta\phi_5=5.6^\circ$ - założono tutaj również niezależność błędów pomiarowych.

Jako błędy wyznaczenia czasów otwarcia migawki do punktów $p_i \in \{1,5\}$ przyjęto odległości wartości skrajnych od wartości średniej (rozkłady były rozkładami prostokątnymi – wyjaśnienie znajduje się przy omawianiu Rysunku Z.4.6). Wyniosły one kolejno $\Delta t_0 = 0$, $\Delta t_1 = 8$ ms, $\Delta t_2 = 8$ ms, $\Delta t_3 = 8.5$ ms, $\Delta t_4 = 8$ ms, $\Delta t_5 = 8$ ms. Wartości średnie czasów natomiast były równe $t_0 = 0$, $t_1 = 48.7$ ms, $t_2 = 71.7$ ms, $t_3 = 92.0$ ms, $t_4 = 108.8$ ms, $t_5 = 128.3$ ms.

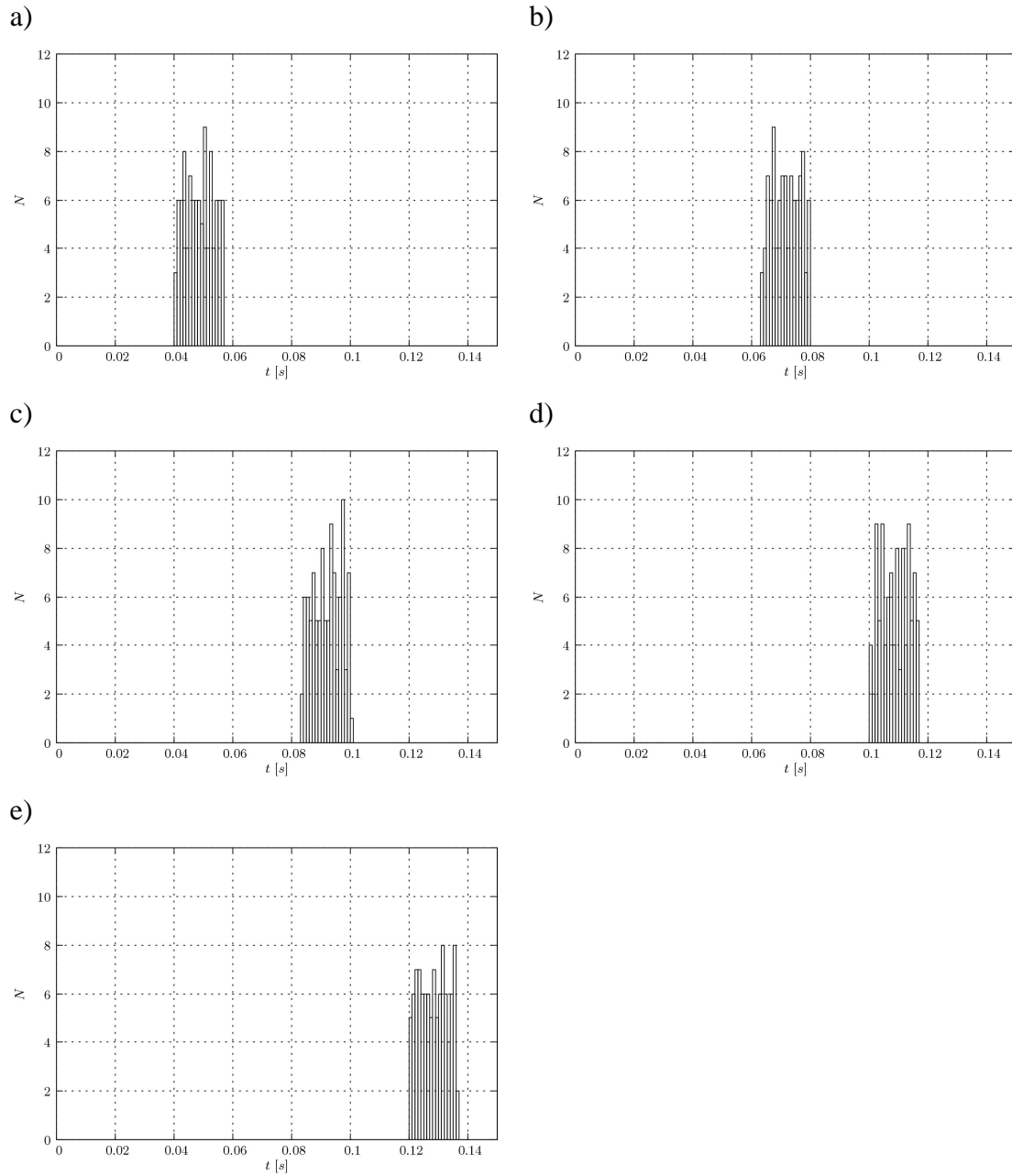


Rysunek Z.4.5. Zależność kąta otwarcia migawki rejestratora od czasu (po wyzwoleniu)

Z Rysunku Z.4.5 można odczytać, że czas t , który upłynie od momentu wyzwolenia do momentu kiedy krawędź (punkt p_0) migawki przesunie się w położenie środkowe wynosi (92 ± 8) ms oraz, że, na przykład, migawka rozpoczyna odsłaniać po czasie około (49 ± 8) ms. Biorąc to pod uwagę, można przyjąć, że rzeczywiste opóźnienie od momentu wyzwolenie (wybuchu) będzie powiększone o około 50 ms od tego ustawionego na sterowniku rejestratora kropel.

Migawka jest poruszana serwomechanizmem, którego sterowanie położeniem sprowadza się do zmiany wypełnienia sygnału prostokątnego. Im częstotliwość sygnału

sterującego jest wyższa tym precyzyjniejsze może być sterowanie. Kiedy dostarczana do serwomechanizmu częstotliwość sygnału prostokątnego była zbyt duża powyżej 65 Hz (przy przewodzie połączeniowym pomiędzy sterownikiem i rejestratorem równym około 50 m) serwomechanizm nie pracował stabilnie. Asynchroniczne wyzwolenie może pojawić się w dowolnym momencie okresu, którego szerokość wynosi około 16.3 ms. Rozkład prawdopodobieństwa dla tego zdarzenia jest równomierny, a jego szerokość jest równa okresowi sygnału podawanego na wejście sterujące serwomechanizmu. Wykresy przedstawione na Rysunku Z.4.6 przedstawiają rozkłady prawdopodobieństwa czasów otwarcia dla pięciu wytypowanych wcześniej punktów $p_1 \div p_5$.



Rysunek Z.4.6. Rozkłady prawdopodobieństwa czasów otwarcia migawki dla kolejnych położeń: a) p1; b) p2; c) p3; d) p4; e) p5

Załącznik nr 5

WYZNACZENIE PARAMETRÓW ROZKŁADU KROPEL AEROZOLU WODNEGO

Rozpatruję rozkład kropeł w funkcji promienia kropeł [77-79]:

$$n(r) = N_0 r^\mu e^{-\frac{\mu}{a_0} r} \quad (\text{Z.5.1})$$

Unormowanie rozkładu:

$$\begin{aligned} C \int_0^{\infty} n(r) dr &= 1 \Rightarrow C = \left(\int_0^{\infty} n(r) dr \right)^{-1} \\ \int_0^{\infty} n(r) dr &= \int_0^{\infty} N_0 r^\mu e^{-\frac{\mu}{a_0} r} dr = \left\{ \frac{\mu}{a_0} r = m \right\} = N_0 \int_0^{\infty} \left(\frac{a_0}{\mu} m \right)^\mu e^{-m} \frac{a_0}{\mu} dm = \\ &= N_0 \left(\frac{a_0}{\mu} \right)^{\mu+1} \int_0^{\infty} m^\mu e^{-m} dm = \{ \mu = p + 1 \} = N_0 \left(\frac{a_0}{\mu} \right)^{\mu+1} \int_0^{\infty} m^{p-1} e^{-m} dm = \\ &= N_0 \left(\frac{a_0}{\mu} \right)^{\mu+1} \Gamma(p) = N_0 \left(\frac{a_0}{\mu} \right)^{\mu+1} \Gamma(\mu + 1) \end{aligned}$$

$$C = \left(N_0 \left(\frac{a_0}{\mu} \right)^{\mu+1} \Gamma(\mu + 1) \right)^{-1} \quad (\text{Z.5.2})$$

Rozkład unormowany ma postać:

$$n_u(r) = \left(\left(\frac{a_0}{\mu} \right)^{\mu+1} \Gamma(\mu + 1) \right)^{-1} r^\mu e^{-\frac{\mu}{a_0} r} \quad (\text{Z.5.3})$$

Wartość oczekiwana rozkładu kropeł $E(r)$:

$$E(r) = \int_0^{\infty} r n_u(r) dr = \left(\left(\frac{a_0}{\mu} \right)^{\mu+1} \Gamma(\mu + 1) \right)^{-1} \int_0^{\infty} r^{\mu+1} e^{-\frac{\mu}{a_0} r} dr =$$

$$\begin{aligned}
 &= \left\{ \frac{\mu}{a_0} r = t \right\} = \left(\left(\frac{a_0}{\mu} \right)^{\mu+1} \Gamma(\mu+1) \right)^{-1} \int_0^{\infty} \left(\frac{a_0}{\mu} t \right)^{\mu+1} e^{-t} \frac{a_0}{\mu} dt = \\
 &= \left(\left(\frac{a_0}{\mu} \right)^{\mu+1} \Gamma(\mu+1) \right)^{-1} \left(\frac{a_0}{\mu} \right)^{\mu+2} \int_0^{\infty} t^{\mu+1} e^{-t} dt = \{z = \mu + 2\} = \\
 &= \left(\left(\frac{a_0}{\mu} \right)^{\mu+1} \Gamma(\mu+1) \right)^{-1} \left(\frac{a_0}{\mu} \right)^{\mu+2} \int_0^{\infty} t^{z-1} e^{-t} dt \\
 &= \left(\left(\frac{a_0}{\mu} \right)^{\mu+1} \Gamma(\mu+1) \right)^{-1} \left(\frac{a_0}{\mu} \right)^{\mu+2} \Gamma(z) = \\
 &= (\Gamma(\mu+1))^{-1} \frac{a_0}{\mu} \Gamma(\mu+2) = \frac{a_0 \Gamma(\mu+2)}{\mu \Gamma(\mu+1)} = \frac{a_0 (\mu+1) \Gamma(\mu+1)}{\mu \Gamma(\mu+1)} = \left(\frac{a_0}{\mu} \right) (\mu+1) \\
 &E(r) = \left(\frac{a_0}{\mu} \right) (\mu+1) \tag{Z.5.4}
 \end{aligned}$$

Wyznaczenie momentu $E(r^2)$:

$$\begin{aligned}
 E(r^2) &= \int_0^{\infty} r^2 n_u(r) dr = \left(\left(\frac{a_0}{\mu} \right)^{\mu+1} \Gamma(\mu+1) \right)^{-1} \int_0^{\infty} r^{\mu+2} e^{-\frac{\mu}{a_0} r} dr = \left\{ \frac{\mu}{a_0} r = m \right\} = \\
 &= \left(\left(\frac{a_0}{\mu} \right)^{\mu+1} \Gamma(\mu+1) \right)^{-1} \left(\frac{a_0}{\mu} \right)^{\mu+3} \int_0^{\infty} m^{\mu+2} e^{-m} dm = \{w = \mu + 3\} = \left(\frac{a_0}{\mu} \right)^2 \frac{\Gamma(w)}{\Gamma(\mu+1)} \\
 &= \\
 &= \left(\frac{a_0}{\mu} \right)^2 \frac{\Gamma(\mu+3)}{\Gamma(\mu+1)} = \left(\frac{a_0}{\mu} \right)^2 \frac{(\mu+2)(\mu+1)\Gamma(\mu+1)}{\Gamma(\mu+1)} = \left(\frac{a_0}{\mu} \right)^2 (\mu+1)(\mu+2) \\
 &E(r^2) = \left(\frac{a_0}{\mu} \right)^2 (\mu+1)(\mu+2) \tag{Z.5.5}
 \end{aligned}$$

Wyznaczenie wariancji rozkładu $V(r)$:

$$\begin{aligned}
 V(r) &= E(r^2) - E^2(r) \\
 V(r) &= \left(\frac{a_0}{\mu} \right)^2 (\mu+1)(\mu+2) - \left(\left(\frac{a_0}{\mu} \right) (\mu+1) \right)^2
 \end{aligned}$$

$$V(r) = \left(\frac{a_0}{\mu}\right)^2 (\mu + 1) \quad (\text{Z.5.6})$$

Wyznaczenie odchylenia standardowego rozkładu σ :

$$\begin{aligned} \sigma(r) &= \sqrt{V(r)} \\ \sigma(r) &= \frac{a_0}{\mu} \sqrt{\mu + 1} \end{aligned} \quad (\text{Z.5.7})$$

Rozpatrując rozkład kropeł w funkcji średnicy kropeł (d) otrzymuje się wartość oczekiwaną

$$E(d) = 2 \left(\frac{a_0}{\mu}\right) (\mu + 1) \quad \text{oraz} \quad \sigma(d) = 2 \frac{a_0}{\mu} \sqrt{\mu + 1}.$$

BIBLIOGRAFIA

- [1] Sullivan J.D. and Kingery Ch.; *High Explosive Dissemination for a High Explosive Air Bomb*, US Patent No. 5303653.
- [2] Papliński A., Włodarczyk E., *Modele teoretyczno-doświadczalne wybuchu paliowo-powietrznego*, opr. wewnętrzne ITWL, Warszawa, listopad 1987 (64 str.).
- [3] Dierdorf D. and Hawk J. 2006; *Blast Initiated Deluge System. An Ultra-High-Speed Fire Suppression System*, Preprint AFRL-ML-Ty-TP-2006-4511.
- [4] Stebnovskii S. V, *Pulsed Dispersion as the Critical Regime of Destruction of a Liquid, Volume Combustion, Explosion, and Shock Waves*, Vol. 44, No. 2, pp. 228–238, 2008.
- [5] Orzechowski Z. *Rozpylanie cieczy*, WNT, Warszawa 1976.
- [6] Orzechowski Z. Prywer J., *Rozpylanie cieczy w urządzeniach energetycznych*, WNT, Warszawa 1994.
- [7] Orzechowski Z. Prywer J., *Wytwarzanie i zastosowanie rozpylanej cieczy*, WNT, Warszawa 2008.
- [8] *Współczesna metrologia, zagadnienia wybrane*, WNT, Warszawa 2004, rozdział 2, Mroczka J. *Metrologia w procesie poznania*, 17-64.
- [9] praca zbiorowa pod redakcją J. Mroczki, *Problemy metrologii elektronicznej i fotonicznej*, tom 2, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2009.
- [10] Mroczka J., *Metrologiczne problemy wykorzystania światła rozproszonego do badań rozkładu wielkości cząstek w roztworach dyspersyjnych*, Metrologia i Systemy Pomiarowe, Monografia 4, Warszawa 1990.
- [11] Polak A. G., Mroczka J., *Pośrednie pomiary właściwości obiektów złożonych*, [W:] *Problemy metrologii elektronicznej i fotonicznej*, J. Mroczka (red.), Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2008, .
- [12] Mroczka J., *Light scattering at a small angle with the use of Lorenz-Mie theory in particle sizing*, Part. Syst. Charact., 1989, 6, 86-88.
- [13] Mroczka J., Szczuczyński D. K., *Wpływ modelu rozpraszania światła na jakość rozwiązań zagadnienia odwrotnego w pomiarach nefelometrycznych*, Pomiary, Automatyka, Kontrola 2007, 53 (9bis, t. 1), 242-245.

- [14] Mrocza J., Szczuczyński D. K., *Problem odwrotny – jakość rekonstrukcji funkcji rozkładu wielkości cząstek w pomiarach nefelometrycznych i turbidymetrycznych*, *Pomiary, Automatyka, Kontrola* 2007, 53 (9bis, t. 1), 246-249.
- [15] Roman Dygdała, Krzysztof Stefański, Damian Lewandowski, Maria Ingwer-Żabowska, Michał Kaczorowski; „*Aerosol Produced by Explosive Detonation in a Water Bag as Fire Extinguishant.*”, 3rd International Conference IPOEX 2006, Ustroń – Jaszowiec 20 –22 czerwca 2006 r.
- [16] Roman Dygdała, Krzysztof Stefański, Andrzej Papliński, Damian Lewandowski, Grzegorz Śmigielski, Michał Kaczorowski; „*Physical Foundations of Water Spray Production Using Explosive Method*”, International Conference IPOEX 2007, Ustroń– Jaszowiec, czerwiec 2007 r.
- [17] Roman Dygdała, Krzysztof Stefański, Grzegorz Śmigielski, Damian Lewandowski, Michał Kaczorowski, „*Aerosol produced by explosive detonation*”, Kongres Metrologii, Kraków 9-13 września 2007, *Pomiary, Automatyka, Kontrola* 53 9 2007.
- [18] Roman Dygdała, Grzegorz Śmigielski, Damian Lewandowski, Michał Kaczorowski; „*Badanie parametrów fali uderzeniowej powstającej przy wytwarzaniu aerozolu wodnego metodą wybuchową*”, praca przyjęta do druku: *Problemy Techniki Uzbrojenia, Zeszyt 104, Nr 4/2007, str. 71-77, Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia.*
- [19] Krzysztof Stefański, Damian Lewandowski, Roman S. Dygdała, Grzegorz Śmigielski, Michał Kaczorowski, Maria Ingwer-Żabowska; „*Explosive Formation and Spreading of Water Spray Cloud – Theoretical Models and Experiments*”, 2nd IMEKO TC19 Conference on Environmental Measurements, MEFNM 10 – 12 September 2008, Budapest, Hungary, str. 56-58.
- [20] Grzegorz Śmigielski, Damian Lewandowski, Roman S. Dygdała, Krzysztof Stefański; „*Water Capsule Flight – A Theoretical Analysis and experimental verification*”, 2nd IMEKO TC19 Conference on Environmental Measurements 1st IMEKO, MEFNM 10 – 12 September 2008, Budapest, Hungary, str. 59-61.
- [21] Roman Dygdała, Michał Kaczorowski, Damian Lewandowski, Grzegorz Śmigielski, Krzysztof Stefański, Andrzej Papliński; „*Analiza modelowa Wybuchowego Napędzania i Dyspersji Warstwy Ciecży*”, VII Międzynarodowa

- Konferencja Uzbrojeniowa, Naukowe Aspekty Techniki Uzbrojenia i Bezpieczeństwa, Pułtusk wrzesień, 2008, str. 95-104.
- [22] R. Dygdała, M. Kaczorowski, D. Lewandowski, G. Śmigielski, K. Stefański, J. Borkowski; „*Badanie wpływu właściwości detonacyjnych materiału wybuchowego na proces wybuchowego aerozolowania*”, sesja plakatu, VII Międzynarodowa Konferencja Uzbrojeniowa, Naukowe Aspekty Techniki Uzbrojenia i Bezpieczeństwa, Pułtusk, wrzesień 2008 r., str. 87-94.
- [23] Roman Dygdała, Krzysztof Stefański, Damian Lewandowski, Grzegorz Śmigielski, Maria Ingwer-Żabowska; „*Explosive Water-Spray Formation: Theoretical Models, Experiments, Metrology.*”, Praca opublikowana w Biuletyn WAT, grudzień 2008.
- [24] Roman Dygdała, Krzysztof Stefański, Damian Lewandowski, Grzegorz Śmigielski; „*Water Capsule Flight – A Theoretical Analysis and Experimental Verification*”, Praca opublikowana w: *Metrologia i Systemy Pomiarowe*, luty 2009.
- [25] Grzegorz Śmigielski, Roman Dygdała, Mieczysław Kunz, Damian Lewandowski, Krzysztof Stefański; „*High Precision Delivery of a Water Capsule. I Theoretical Model, Numerical Description and Control System*”, XIX IMEKO World Congress Fundamental and Applied Metrology, September 6÷11, 2009, Lisbon, Portugal.
- [26] Grzegorz Śmigielski, Roman Dygdała, Mieczysław Kunz, Damian Lewandowski, Krzysztof Stefański; „*Precision Delivery of a Water Capsule. II Results of Field Experiments*”, XIX IMEKO World Congress Fundamental and Applied Metrology, September 6÷11, 2009, Lisbon, Portugal.
- [27] Grzegorz Śmigielski, Roman Dygdała, Krzysztof Stefański, Damian Lewandowski, Wiesław Urbaniak; „*Measuring shock-wave parameters during explosive water-spray production*”, XIII Krajowa i IV Międzynarodowa Konferencja Naukowo – Techniczna, *Metrologia w Technikach Wytwarzania*, 23-25 września 2009, Poznań – Żerków.
- [28] Papliński A., Dygdała R., Kaczorowski M., Lewandowski D., Śmigielski G., Stefański K., “Model analysis of explosive driving fragmentation of the liquid layer”, *Scientific Aspects of Armament & Safety Technology*, vol. I, Military University of Technology, Warszawa 2008, str. 95÷104.

- [29] Roman Dygdała, Krzysztof Stefański, Damian Lewandowski, Grzegorz Śmigielski; „*Water Capsule Flight – A Theoretical Analysis and Experimental Verification*”, Metrology and Measurement Systems, 2009, str. 313 ÷ 322.
- [30] Stefański K., Lewandowski D., Dygdała R., M. Kaczorowski, M. Ingwer-Zabowska, G. Śmigielski, A. Papliński, Explosive Formation and Sprinding of Water-Spray Cloud – Experimental Development and Model Analyses, *Jurnal of Energetic Materials* 2009, 6(2), 103 ÷ 117.
- [31] Morka A. *Wybuchowe rozpraszanie cieczy*, PWN, Warszawa 2001.
- [32] Soo S., *Fluid Dynamics of multiphase systems*, Blaisdell Publishing Company, Lexington, 1967.
- [33] Ishii M., *Thermo – fluid dynamics theory of two – phase flow*, Etrolles, Paris, 1975.
- [34] Papliński A., *Evaluation of hazard parameters imposed by expansion of high-pressure cloud in the air*, *Polish Journal of Environmental Studies*, vol. 17, No. 3C, 2008, pp. 89 – 93.
- [35] Włodarczyk E., *Wstęp do mechaniki wybuchu*, PWN, Warszawa 1994.
- [36] Boris J., Book D., *Flux-corrected transport. I. SHASTA, a fluid transport algorithm that works*, *J. Comp. Physics*, vol. 11, 1973, pp. 38 – 69.
- [37] Yee H., Warming R., Harten A., *Application of TVD schemes for the Euler equations of gasdynamics*, *Lectures in Applied Mathematics*, vol. 22, Pt. II, 1985, pp. 357 – 377.
- [38] Jach K., *Modelowanie komputerowe zjawisk kumulacyjnych*, WAT, Warszawa, 1990.
- [39] Jach K., *Komputerowe modelowanie dynamicznych oddziaływań metodą punktów swobodnych*, PWN, Warszawa, 2003.
- [40] Papliński A.: *Modelowanie spalania i wybuchu w niejednorodnych fizycznie ośrodkach reaktywnych*, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2009.
- [41] Krzeczkowski S. A.: *Measurement of liquid droplet disintegration mechanisms*, *Int. J. Multiphase Flow*, vol. 6, 1980, pp. 227 – 239.
- [42] Wierzba A., Takayama: *Shock-wave ignition of liquid fuel drops*, *AIAA J.* vol. 9, No 5, 1971, pp. 880 – 885.
- [43] Wiler K., *Ochrona lasów przed pożarami*, S.A. PSP Poznań 2000.
- [44] Wiśniewski W., *Organizacja i technologia gaszenia pożarów lasów*, PSP Poznań 2001.

- [45] Budna E., Grzybowiska L., Karczewicz A., *Leśnictwo 2006*, Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2006.
- [46] Matysiak M., *Raport o stanie lasów w Polsce 2005*, Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, Warszawa 2006.
- [47] Rosenkiewicz D., Bogdański M., Zarzycki J., Łabędzki J., *Analiza parametrów fal podmuchowych generowanych ładunkami gaśniczymi*, materiały konferencyjne zaprezentowane na II Międzynarodowej Konferencji IPOEX 2005: Materiały wybuchowe, Badania – Zastosowanie – Bezpieczeństwo, Tom I 2006.
- [48] *Neue Wege bei Waldbrandbekämpfung*, 112 Magazin der Frauerwehr 11, 1994.
- [49] Sztajner J., *Możliwości adaptacji wybuchowych metod gaszenia pożarów lasu (niemieckiej i hiszpańskiej) do warunków polskich*, praca zaliczeniowa XV kursu specjalistów ochrony przeciwpożarowej, SGSP Warszawa 1999.
- [50] *Prace minerskie i niszczenia*, Sztab Generalny WP Szefostwo Wojsk Inżynieryjnych, Inż. 572/94, Warszawa 1994.
- [51] Stebnovskii S. V., “*Mechanism of pulsed breakdown of a liquid volume*” J. Appl. Mech. Tech. Phys., 30, No. 2, 285–290 (1989).
- [52] Stebnovskii S. V., “*Development of initial perturbations of the external boundary of an expanding gas–liquid ring*” J. Appl. Mech. Tech. Phys., 23, No. 5, 633–637 (1982).
- [53] L. I. Sedov L. I., *Mechanics of Continuous Media*, Nauka, Moscow (1970), Vol. 1.
- [54] Lyshevskii, “*Features of breakdown of the liquid by mechanical pressure injectors*” in: Scientific papers of the Novocherkassk Polytechnical Institute, Novocherkassk (1961).
- [55] Franks F., *Water*, Cambridge: University of Cambridge 1984. (Przekład na język polski: Franks F., *Woda*, Warszawa: WNT 1988).
- [56] Lamb H., *The early stage of a submarine explosion*, Phil. Mag. and J. of Sci. 1923, nr 266.
- [57] Cole R. H., *Underwater explosions*, Princeton: Princeton University Press, 1944 (przekład).
- [58] Walsh J. M., Rice H. H., *Dynamic compression of liquids from measurements of strong shock waves*, J. Chem. Phys. 1957, vol. 26, nr 4.
- [59] A.K. Wróblewski, J.A.Zakrzewski: *Wstęp do Fizyki*, Tom 2, część 2, WN PWN, Warszawa 1991.

- [60] Mizerski W., Nowaczek W.: *Tablice fizyczno-astronomiczne*, Wydawnictwo Adamantan, 1995.
- [61] Massalski J., Massalska M., *Fizyka dla inżynierów*, część 1, WNT, Warszawa 1971.
- [62] Orzechowski Z., Prywer J., Zarzycki R., *Mechanika płynów w inżynierii środowiska*, WNT, Warszawa 2001.
- [63] Orzechowski Z., Prywer J., Zarzycki R., *Zadania z mechaniki płynów w inżynierii środowiska*, WNT, Warszawa 2001.
- [64] Siedow L. I., *Analiza wymiarowa i teoria podobieństwa w mechanice*, WNT, Warszawa 1967.
- [65] Maranda A., Sałaciński T., Lewandowska A., *Materiały wysokoenergetyczne*, T. 1, Instytut Przemysłu Organicznego, Warszawa 2009.
- [66] Nowak A., *Statystyka dla fizyków. Podręcznik*, PWN, Warszawa 2002.
- [67] Gonet M.: *Excel w obliczeniach naukowych i technicznych*, Helion, 2010.
- [68] Sierański K., Jeziński K., Kołodka B.: *Wzory i prawa z objaśnieniami, Część 1*, Oficyna Wydawnicza Scripta, Wrocław 2005.
- [69] Bielski A., Ciuryło R., *Podstawy metod opracowania pomiarów*, Zakład Poligrafii UMK, Toruń 2001.
- [70] Szydłowski H., *Teoria pomiarów*, PWN, Warszawa 1981.
- [71] G. Mie, *Annalen der Physik.*, 25, 377-445 (1908).
- [72] M. Born, E. Wolf: *Principles of optics*, Pergamon Press, Oxford 1970.
- [73] J. A. Stratton: *Electromagnetic theory*, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York 1941.
- [74] Bohren C.F., Huffman D.R. *Absorption and scattering of light by small particles* (Wiley, 1998)(545s)(ISBN 0471293407).
- [75] Taylor J. R., *Wstęp do analizy błędów pomiarowych*, PWN, Warszawa 1995.
- [76] F. Kohlrausch: *Fizyka laboratoryjna*, Tom 2, PWN, Warszawa 1961.
- [77] B. Mayer, M. Schröder, R. Preusker, and L. Schüller, *Remote sensing of water cloud droplet size distributions using the backscatter glory: a case study*, Atmos. Chem. Phys., 4, 1255–1263, 2004.
- [78] Brenguier J., Pawłowska H., Schüller L., Preusker R., Fischer J. and Fouquart Y.: *Radiative properties of boundary layer clouds: Droplet effective radius versus number concentration*, J. Atm. Sci, 57, 803–821, 2000.

BIBLIOGRAFIA

- [79] Breon F. and Goloub P.: *Cloud droplet effective radius from space borne polarization measurements*, Geophys. Res. Lett., 25, 1879–1882, 1998.