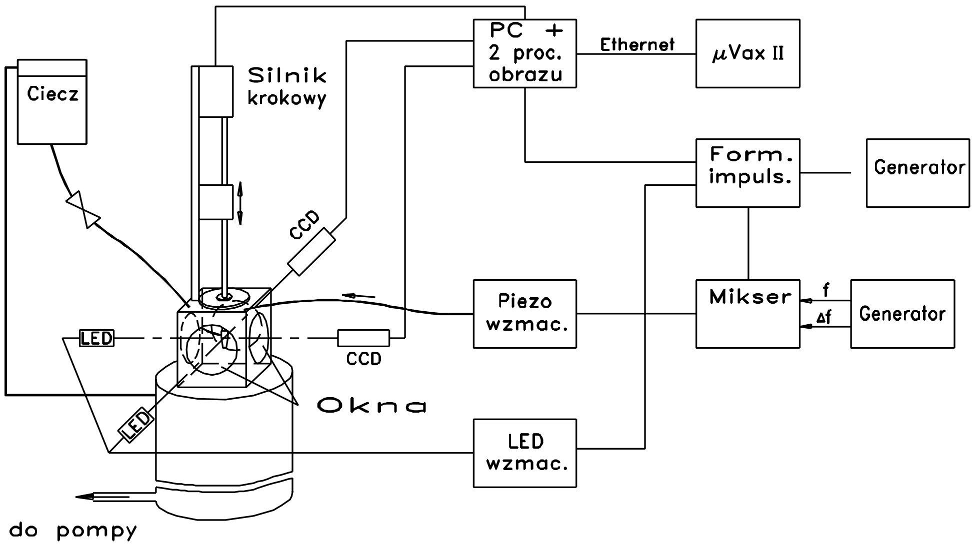
1. Metodyka pomiarów

Opisane w niniejszej pracy badania doświadczalne zostały wykonane przy zastosowaniu szeregu nowych lub zaktaualizowanych metod eksperymentalnych, bazujących na zastosowaniu kamery półprzewodnikowej typu CCD, cyfrowej rejestracji obrazów z wykorzystaniem video-procesora i dalszej obróbki i analizy tych obrazów z wykorzystaniem technik komputerowych. Układ doświadczalny wykorzystywany do badań jest w zasadniczej części podobny dla wszystkich opisanych badań. W związku z tym na wstępie przedstawimy ogólny schemat stanowiska pomiarowego, jak też idee i główne cechy stosowanych metod.

1.1 Stanowisko pomiarowe

Schemat stanowiska pomiarowego stosowanego w doświadczeniach nad zachowaniem się strug i kropel przedstawia rys. 1.1. Struga cieczy wypływa pionowo w dół ze specjalnie skonstruowanej dyszy [37] do hermetycznej komory o objętości $0,7m^3$. **We wszystkich opisanych eksperymentach struga wypływa pionowo w dół**, mimo mylącego czasem poziomego przedstawienia jej na rysunkach. Przepływ cieczy wywołany jest różnicą ciśnienia w zbiorniku z cieczą i ciśnienia gazu w komorze pomiarowej. Dzięki wysoko wydajnej pompie próżniowej ($8m^3/min$) podłączonej do komory pomiarowej, doświadczenia mogły być przeprowadzone zarówno w warunkach normalnego, jak i obniżonego ciśnienia gazu otaczającego strugę.
Poprzez wymianę przedniej części dyszy średnica wypływającej strugi może być zmieniana w zakresie 0,05 - 1,8mm. Tak małe średnice i niewielkie prędkości wypływu ($\approx 5m/s$) gwarantują laminarność przepływu w dyszy wypływowej, jak również pozwalają na zaniedbanie efektów aerodynamicznych dla strug i kropli poruszających się w otaczającym je gazie .
Wypływająca struga poddawana była kontrolowanym zaburzeniom przy pomocy przetwornika piezoelektrycznego wbudowanego w tylną ściankę komory dyszy. Periodyczne impulsy napięcia, o częstotliwości zbliżonej do częstotliwości własnej strugi (długości fali Rayleigh'a), pozwalają uzyskać kontrolowany, periodycznie powtarzalny rozpad strugi na krople. Dysza wypływowa została umocowana na prowadnicy sterowanego komputerem silnika krokowego, co umożliwia precyzyjne przemieszczanie wycinka obserwowanej strugi (lub kropli) w stosunku do rejestrującej ją kamery video.
Obserwowacje przeprowadzono kamerą video oświetlaną bezpośrednio przez równoległą wiązkę światła przechodzącego przez badany obiekt. Wskutek dużej krzywizny powierzchni badanych obiektów, światło przechodzące przez przezroczystą ciecz ulega



Rysunek 1.1: *Schemat układu pomiarowego stosowanego do badań strug i kropel. Główne elementy to: zbiornik, 2 kamery CCD, komputer PC z dwoma procesorami obrazu połączony z siecią ethernet, oświetlenie diodami LED, pionowo umocowany silnik krokowy z dyszą wypływową oraz układy elektroniczne sterujące wzmacniacze impulsów kierowanych do diod LED i przetwornika piezoceramicznego.*

silnemu odchyleniu i nie jest rejestrowane przez kamerę. W rezultacie obserwowane obiekty są widoczne jako ciemne plamy na jasnym tle. Taka metoda pozwala maksymalnie wykorzystać intensywność oświetlenia a dzięki wysoko kontrastowemu obrazowi zminimalizować efekty dyfrakcyjne.

Ponieważ w centralnej części kropel i strug kąt padania światła jest mały, część oświetlającej je wiązki światła przedostaje się tam do kamery. Na zdjęciach objawia się to w postaci nieregularnej jasnej plamy widocznej w centrum kropel lub wąskiej pręgi dla strug. Jeśli powierzchnia cieczy nie jest wystarczająco gładka, np. wskutek istnienia fal powierzchniowych, kształt prześwitującej plamy ulega zmianie. Jest to źródłem dodatkowej informacji o lokalnych deformacjach powierzchni.

Do rejestracji obrazów wykorzystywane były kamery typu CCD (Charge Coupled Device), przeważnie model Sony XC77CE. Kamera półprzewodnikowa typu CCD gwarantuje uzyskanie geometrycznie niezdeformowanego obrazu, przy stosunkowo dużej rozdzielczości przestrzennej (768 x 512 pixli), wysokiej dynamice i czułości [43]. Obrazy z kamery CCD rejestrowano w postaci cyfrowej przy wykorzystaniu przetwornika obrazu (VS100 Imaging Inc.), zainstalowanego w komputerze typu PC386. Celem dalszej obróbki i analizy, obrazy przechowywane były na dyskach magnetycznych i magneto-optycznych komputera.

Jako źródło światła wykorzystane zostały zasilane impulsowo diody świecące (LED) dużej mocy [44]. Typowy czas oświetlenia wynosił $200ns$. Dla obiektów o wielkości rzędu ułamków milimetra obserwowanych pod dużym powiększeniem i poruszających się z prędkością kilku m/s, jest to wartość konieczna, aby uniknąć rozmycia konturów obrazu.

1.2 Metody rejestracji obrazów

Trzy specjalnie opracowane metody rejestracji [42] zostały wykorzystane do analizy badanych procesów.

1.2.1 Metoda fazowo-stroboskopowa

W metodzie tej wykorzystano periodyczność zjawiska. Oświetlając strugę impulsami światła o częstotliwości równej częstotliwości zaburzeń wywołanych przy pomocy przetwornika piezo-elektrycznego możliwe jest prowadzenie obserwacji stroboskopowych. Wykorzystując specjalnie do tego celu skonstruowany cyfrowy przesuwnik fazy, możliwe jest również obserwowanie dynamiki rozpadu w „zwolnionym tempie“, regulowanym względną różnicą częstotliwości pobudzania i oświetlania strugi. Dla zadanej częstotliwości zjawiska F_z (w tym wypadku częstotliwość pobudzania drgań strugi) i częstotliwości skanera fazy F_s, czas rzeczywisty dt wiąże się z czasem obserwacji DT prostą relacją:

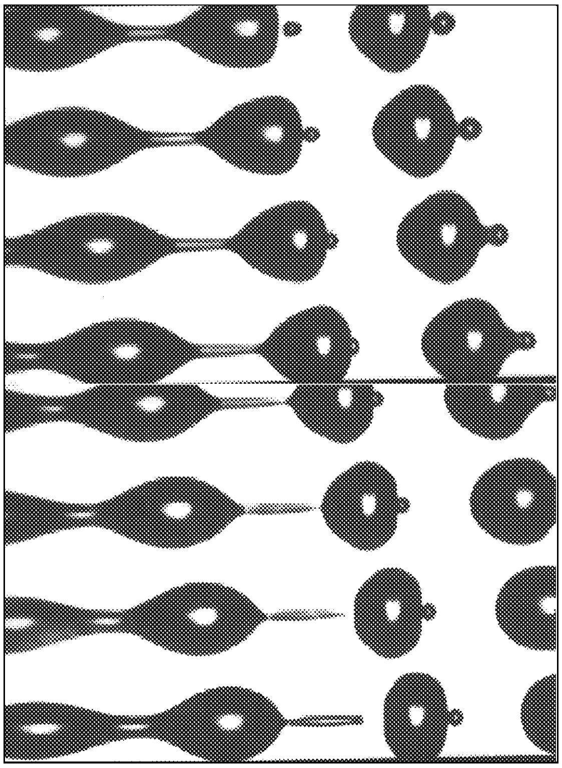
$$dt = DT\frac{F_s}{256F_z} \tag{1.1}$$

Współczynnik 256 wynika z konstrukcji przyrządu.
Jak łatwo zauważyć dla typowych częstotliwości pobudzania strugi rzędu $10kHz$, stosując częstotliwość skanowania $1Hz$, można powiększyć rozdzielczość czasową 2560000 razy. Umożliwia to rejestrowanie procesów o charakterystycznym czasie $1\mu s$ w czasie rzeczywistym paru sekund.
Aby uniknąć rozmycia rejestrowanego obrazu spowodowanego ewentualnymi zakłóceniami zewnętrznymi (drgania własne stanowiska badawczego, drgania powietrza itp.), w momencie rejestracji struga oświetlana była tylko jednym silnym i krótkim impulsem światła z diody świecącej. Szczegóły tej metody rejestracji znaleźć można w pracach [3, 42].
Zasadniczą zaletą metody jest jej duża prostota, możliwość interaktywnej obserwacji i stosunkowo duża rozdzielczość czasowa (w naszym przypadku rzędu $1\mu s$), ograniczona praktycznie jedynie powtarzalnością obserwowanego zjawiska. Ten ostatni fakt staje się jednocześnie główną wadą metody, uniemożliwiającą jej zastosowanie jeśli nie jest możliwa stabilna kontrola badanego zjawiska. W takich przypadkach, jak również dla kontroli momentu rozpadu strugi, który charakteryzuje pewna stochastyka, konieczne jest stosowanie jednej z niżej opisanych metod, pozwalających na rejestrację zmian w czasie dla zjawisk nieperiodycznych.

1.2.2 Metoda „Frame-Transfer“

Całkowicie nową techniką video, opracowaną specjalnie dla przeprowadzanych badań, jest metoda rejestracji typu „Frame-Transfer“ [34, 36]. Jako jedna z nielicznych pozwala ona na wykorzystanie kamery video jako rejestratora szybkich zjawisk[1].

[1]Standardowa technika video ograniczona jest powtarzalnością obrazu wynoszącą $25Hz$ i jak dotychczas jedynie dzięki kosztownym zabiegom (kamera High-Speed f-my Kodak) możliwe jest zbliżenie się do granicy 6000Hz



Rysunek 1.2: *Rozpad strugi alkoholu zarejestrowany techniką „Frame-Transfer". Interwał czasowy* $19,5\mu s$*, czas błysku LED* $200ns$*. Kolejność rejestracji obrazów od góry w dół, struga wypływa z lewej strony obrazu (kierunek grawitacji od lewej do prawej). Szerokość kadru odpowiada 2,2mm.*

W metodzie tej wykorzystuje się charakterystyczne dla kamer CCD typu Frame-Transfer, pionowe przemieszczanie ładunków elektrycznych (a więc i obrazu generującego te ładunki), zachodzące w stosunkowo krótkim czasie (rzędu $100\mu s$) w przerwie między poszczególnymi pół-obrazami sygnału video. Rejestrując zjawisko właśnie w tym „nielegalnym" dla standardu video przedziale czasu, można uzyskać sekwencję pasków, zawierających obrazy zmian czasowych rejestrowanego obiektu. Ponieważ całkowity czas T_{FT} przesuwu ładunku (frame transfer) jak i fizyczna wielkość obrazu (wielkość sensora CCD) H są dla danego procesu rejestracji wielkościami stałymi, czas obserwacji dt i pionowa rozdzielczość ΔH pojedynczego „paska" obrazu są ze sobą powiązane prostą zależnością:

$$dt = T_{FT}/n, \qquad \Delta H = H/n, \tag{1.2}$$

gdzie n jest liczbą rejestrowanych obrazów (pasków), na które zostają podzielone dwa półobrazy video.

Wybór kompromisu między szybkością (częstotliwością) kamery a pionową rozdzielczością (H/n) zależy od charakteru rejestrowanego obiektu. W praktyce, dla podłużnych obiektów jakimi są strugi cieczy, możliwa jest rejestracja ok. 30 obrazów z przedziałem czasowym ok. $5 \mu s$ [2]. Do badań wykorzystano specjalnie zaadoptowaną kamerę (TH7863 f-my Thomson), w której możliwa jest kontrola okresu rejestracji (czasu pionowego transferu ładunku). Pozwala to na dobranie częstotliwości rejestracji do charakterystycznego czasu zjawiska. Rys. 1.2 przedstawia proces rozpadu strugi zarejestrowany przy użyciu techniki "Frame-Transfer". Widoczne jest 8 faz tego procesu, które składają się na dwa pola obrazu standardu video. Dla zastosowanej kamery o macierzy $2 \times 288 \times 384$ elementów światłoczułych (pixli) rozdzielczość pionowa pojedynczego zdjęcia wynosi 72 a rozdzielczość pozioma 384 pixli. Szczegóły dotyczące metody, opis kamery i przykłady zastosowań zostały przedstawione w pracach [36, 41].

1.2.3 Metoda wielokrotnej ekspozycji

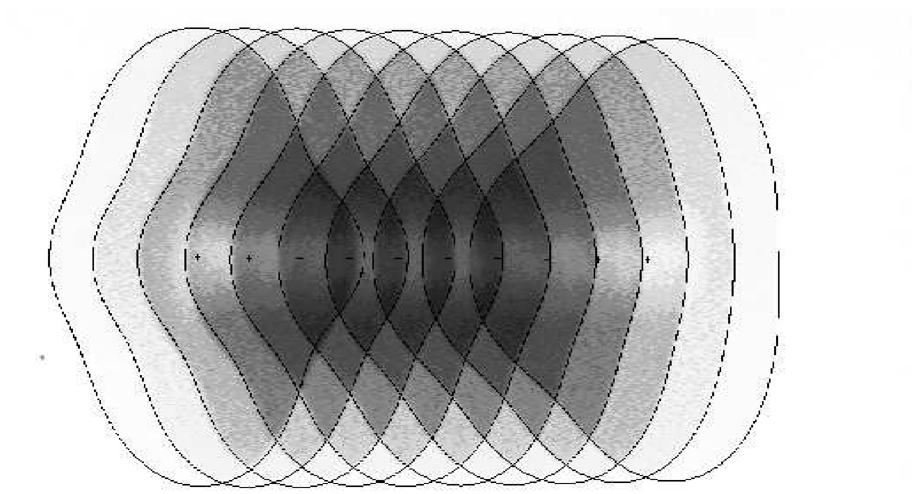
Metoda wielokrotnej ekspozycji do obserwacji szybkich zjawisk jest znaną od czasów początków fotografii. Jednak dopiero zastosowanie techniki video i cyfrowej analizy obrazu czyni z tej metody wygodne narzędzie nie tylko jakościowej obserwacji, ale i dokładnej analizy rejestrowanych zjawisk.

Podstawowe zalety rejestracji z użyciem kamery typu CCD to wysoka dynamika obrazu i liniowość charakterystyki rejestracji natężenia światła. Umożliwia to precyzyjną identyfikację wielokrotnie naświetlonych obrazów poprzez analizę różnic w cyfrowej wartości zaczernienia, wykrywanie konturów obiektów i ich dokładną lokalizację w płaszczyźnie obrazu. Przykład rezultatów takiej analizy pokazuje rys. 1.3.

Dla obiektów o regularnych kształtach (np. krople) możliwe jest dodatkowe wykorzystanie logicznej analizy wykrytych punktów obrazu, celem ich odpowiedniego sklasyfikowania, czy i do którego obrazu należy je przypisać. Dla analizy oscylacji kropel opracowano specjalnie w tym celu program komputerowy pozwalający na automatyczną identyfikację kropli i precyzyjny opis jej kształtu (przez dopasowanie funkcji opisującej kontur). Praktycznie dla standardowej 8-bitowej kamery 20-krotnie naświetlony obraz pozwala poprawnie zidentyfikować wszystkie dwadzieścia obrazów kropli [3, 35]. Dalsze zwiększenie liczby ekspozycji jest możliwe przy zastosowaniu kamer specjalnych o niskim poziomie szumów własnych.

Dzięki zastosowaniu diod półprzewodnikowych jako źródeł światła o wysokiej częstości powtarzania (max. $1 MHz$) i krótkim czasie błysku ($50 ns$-$10 \mu s$) metoda wielokrotnej ekspozycji umożliwia wysoką rozdzielczość czasową ($1 \mu s$). Ograniczeniem metody jest skończona liczba (obecnie ok. 20) możliwych do zarejestrowania w jednej serii obrazów, jak i warunek, aby obserwowany obiekt poruszał się wystarczająco szybko względem kamery (poszczególne obrazy muszą być w płaszczyźnie obrazu przesunięte względem siebie). Pewnym rozwiązaniem dla obiektów poruszających się zbyt wolno jest kombinacja techniki wielokrotnej ekspozycji z techniką „Frame-Transfer". Dzięki pionowemu ruchowi ładunków (obrazu) rejestrowany obiekt może być wtedy dodatkowo „przesuwany" w płaszczyźnie obrazu (por. [36], rys. 5).

[2] Podczas badań drgań podłużnych pręta (lithoclast), gdzie pionowa rozdzielczość nie ma znaczenia, kamera umożliwiła rejestrację 150 obrazów z częstotliwością 1MHz (!)



Rysunek 1.3: *Wielokrotna ekspozycja oscylującej kropli alkoholu o średnicy* $0.21 mm$. *Interwał czasowy* $7,8 \mu s$, *czas błysku* $200 ns$. *Kontury kropli znalezione drogą komputerowej analizy obrazu.*