

P O L S K A A K A D E M I A N A U K
INSTYTUT MASZYN PRZEPLYWOWYCH

PRACE
INSTYTUTU MASZYN
PRZEPLYWOWYCH

TRANSACTIONS
OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

64

WARSZAWA—POZNAN 1974

P A Ń S T W O W E W Y D A W N I C T W O N A U K O W E

PRACE INSTYTUTU MASZYN PRZEPŁYWOWYCH

poświęcone są publikacjom naukowym z zakresu teorii i badań doświadczalnych w dziedzinie mechaniki i termodynamiki przepływów, ze szczególnym uwzględnieniem problematyki maszyn przepływowych

*

THE TRANSACTIONS OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

exist for the publication of theoretical and experimental investigations of all aspects of the mechanics and thermodynamics of fluid-flow with special reference to fluid-flow machinery

KOMITET REDAKCYJNY — EXECUTIVE EDITORS
KAZIMIERZ STELLER — REDAKTOR — EDITOR
JERZY KOŁODKO · JÓZEF ŚMIGIELSKI
ANDRZEJ ŻABICKI

REDAKCJA — EDITORIAL OFFICE
Instytut Maszyn Przepływowych PAN
ul. Gen. Józefa Fiszer 14, 80-952 Gdańsk, skr. pocztowa 621, tel. 41-02-13

Copyright
by Państwowe Wydawnictwo Naukowe
Warszawa 1974

Printed in Poland

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE — ODDZIAŁ W POZNANIU

Nakład 400+90 egz.	Oddano do składania 10 X 1973 r.
Ark. wyd. 11,75. Ark. druk. 9,125	Podpisano do druku 18 V 1974 r.
Papier druk. sat. kl. V, 70 g	Druk ukończono w maju 1974 r.
Nr zam. 689/226.	D-4/448. Cena zł 36,—

DRUKARNIA UNIwersytetu IM. A. MICKIEWICZA W POZNANIU

STEFAN KRZECZKOWSKI, EUGENIUSZ WNUCZAK

Gdańsk, Wrocław

Konstrukcja kamery do szybkiej kinematografii*

W pracy przedstawiono koncepcję i konstrukcję kamery do szybkiej kinematografii oraz zdemonstrowano niektóre z pierwszych rezultatów jej zastosowania.

1. Wstęp

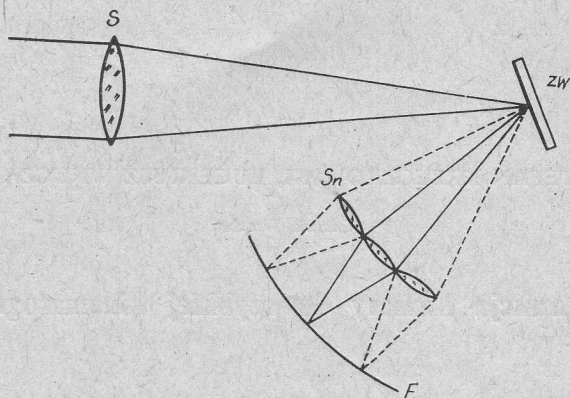
W prowadzonych w Instytucie Maszyn Przepływowych PAN badaniach fluktuacji form cieczy w przepływach dwufazowych, ujawniła się potrzeba rejestracji takich przebiegów z wystarczająco dużymi prędkościami. W tym celu została zbudowana kamera filmowa dużej częstotliwości, opisowi której, jak również wstępnym результатам jej pracy poświęcony jest niniejszy artykuł. Kamera ta powstała przy współpracy Instytutu Maszyn Przepływowych w Gdańsku z Instytutem Fizyki Technicznej Politechniki Wrocławskiej; w pierwszym zaprojektowano i wykonano część mechaniczną, w drugim opracowano i wykonano część optyczną [1, 2, 3].

2. Koncepcja układu optycznego

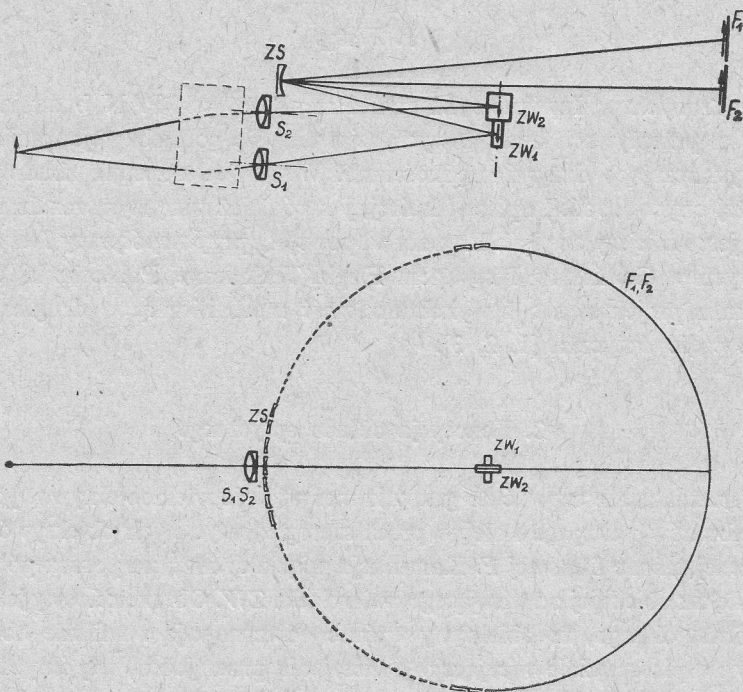
Kamerę można zaszeregować do grupy kamer wtórnie wieloobiektywowych, w których rejestracja obrazów następuje kolejno przez szereg identycznych obiektywów S_n (rys. 1) na nieruchomej taśmie filmowej F . Komutacja wiązki światła na poszczególne obiektywy następuje dzięki odbiciu jej od wirującego zwierciadła ZW . Obraz końcowy jest nieruchomy względem filmu dlatego, że obiektywy wtórne odwzorowują na filmie obraz pośredni, wytworzony na płaszczyźnie wirującego zwierciadła przez jeden, wspólny dla wszystkich obiektyw główny S .

Zasadę działania tego typu kamer z optyczną kompensacją zwierciadła centralnego podał C. D. Miller [4, 5]. Od tego czasu zasada ta była z różnymi modyfikacjami wykorzystywana wielokrotnie. Schemat optyczny kamery przedstawia rys. 2. W stosunku do układu klasycznego zawiera on szereg istotnych modyfikacji. Rolę obiektywów wtórnych spełniają zwierciadła wklęsłe ZS . Obrazy końcowe powstają przez to po przeciwnej stronie osi obrotu. Gabaryty kamery dobrano tak, aby galeria ustawionych jedno przy dru-

* Praca wykonana w ramach problemu resortowego PAN-19, grupa tematyczna 2.



Rys. 1. Schemat ideowy kamery wtórnie wieloobiektywowej



Rys. 2. Schemat optyczny kamery

gim zwierciadeł znajdowała się na tym samym łuku co taśma filmowa. Zastosowanie zwierciadeł zamiast soczewek (S_n — rys. 1) pozwala na zmniejszenie aberracji chromatycznej, obniżenie kosztów, osiągnięcie większej zwartości kamery przy jednoczesnych większych obrazach końcowych niż w kamerze tego typu w układzie klasycznym. Zasadniczym jednak walorem przedstawionego układu jest możliwość rozmieszczenia obrazów na taśmie filmowej tak, że mogą się one nadawać do bezpośredniej projekcji

kinematograficznej za pomocą standardowego projektora. Jest to jedna z najważniejszych zalet kamery, rzadko spotykana w kamerach o dużych częstościach zdjęć.

Użycie ukośnej wiązki odwzorowującej pozwoliło, przez ustawienie zwierciadełek na połowie obwodu kamery, na wykorzystanie wyjątkowo dużego sektora roboczego i tym samym uzyskania dużej ilości zdjęć. Zastosowanie dwóch obiektywów głównych S_1 i S_2 (rys. 2) oraz umieszczenie dwóch (jeden nad drugim) skrzyżowanych względem siebie o 90° dwustronnych zwierciadeł wirujących, współpracujących z dwoma bieżniami filmowymi F_1 i F_2 , zdwajają tę pojemność zdjęć. W omawianej wersji wynosi ona 400 kadrów. Równie istotną cechą takiej „zdwojonej” kamery*) jest to, że nie ma ona martwego okresu w pracy, co czyni zbędnym trudne na ogół synchronizowanie chwili początkowej rejestrowanego procesu z położeniem zwierciadła ZW (kamera jest w każdej chwili gotowa na przyjęcie informacji). Jeżeli źródłem światła jest lampa błyskowa o czasie świecenia krótszym niż połowa okresu obrotu zwierciadła ZW , to również zbędne staje się stosowanie migawki otwierającej kamerę na ten przeciąg czasu.

Całkowitą liczbę zdjęć na jednej taśmie filmowej (równą liczbie wklęsłych zwierciadeł) określa wzór

$$n = 4\alpha \frac{R}{h},$$

gdzie R — promień łuku (jednakowy dla filmu i galerii zwierciadeł wklęsłych), h — podziałka kadrów, α — kąt między promieniem padającym a normalną zwierciadła wirującego, w momencie gdy rzuca ono obraz na skrajne zwierciadełko galerii (w opisanej kamerze $\alpha = \pi/4$).

Częstość zdjęć, równa odwrotności czasu przejścia wiązki wirującej przez jedno zwierciadełko galerii określa wzór:

$$\nu = 4\pi N \frac{R}{h},$$

gdzie N oznacza częstość obrotu zwierciadeł wirujących ZW . W omawianej kamerze $N = 400 \text{ s}^{-1}$, co zapewnia maksymalną częstość zdjęć $\nu = 320\,000 \text{ s}^{-1}$.

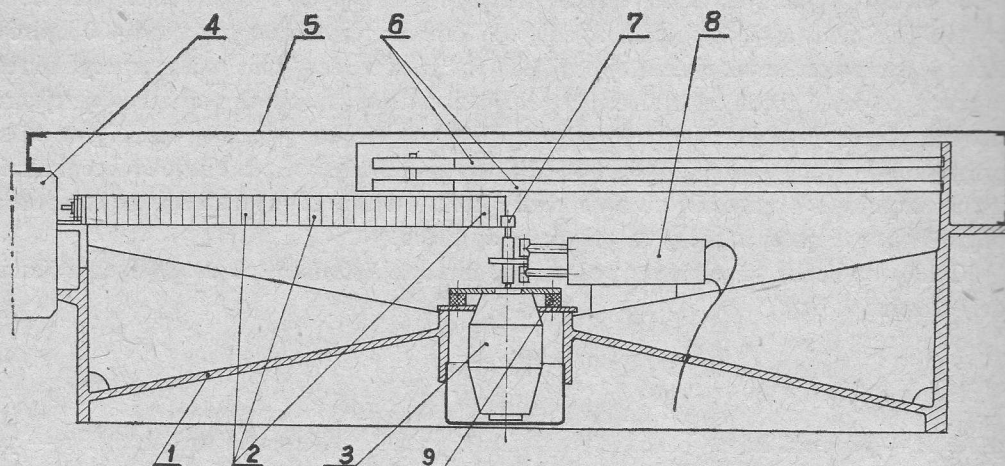
Obiektywy kamery S_1 i S_2 przygotowane są do stałej odległości obiektu (ok. 0,7 m) i dają powiększenie całkowite $\beta \cong 0,8$. Przed obiektywami znajduje się układ zwierciadeł skracających odległość przedmiotu do wartości wyżej podanej i naprowadzający osie optyczne obiektywów na ten sam punkt przedmiotowy.

3. Opis techniczny kamery

Realizację techniczną omówionej wyżej koncepcji kamery przedstawiono na rys. 3 (jest to schemat zestawienia montażowego całości — przekrój osiowy — z wyłączeniem zespołu obiektywowego 4, który będzie omówiony niżej).

*) Kamera ma tylko jedną galerię zwierciadeł, współpracującą z obydwoma układami optycznymi, stąd cudzysłów.

Zarówno galeria zwierciadeł wklęsłych 2 jak bieżnię filmu 6 ulokowane są w zasadniczym korpusie kamery 1 o kształcie koła o średnicy 1 m. Ze względu na duże gabaryty tego korpusu (wynikające z przyjętej koncepcji układu optycznego) oraz określone — wysokie — dokładności ustawienia zwierciadeł i filmu, konieczne było podporządkowanie konstrukcji i technologii wykonania tego elementu wymogom precyzji zasadniczych



Rys. 3. Rysunek kamery (schemat)

1 — korpus, 2 — galeria zwierciadeł wklęsłych, 3 — silnik, 4 — zespół obiektywowy, 5 — pokrywa, 6 — film, 7 — zwierciadła wirujące, 8 — fotoprzetwornik, 9 — amortyzator

wymiarów i ich stabilności w czasie. W tym celu nadano korpusowi dostateczną sztywność przewidując odpowiednią grubość ścian zewnętrznych (10 - 15 mm), wzmacniając je dodatkowo promienistymi żebrami. Wykonano go odlewając ze stopu aluminium*), materiał dostatecznie stabilnego (odlew poddawano wyżarzaniu odprężającemu pomiędzy zasadniczymi zabiegami obróbkowymi, a następnie sezonowaniu przez około 6 miesięcy).

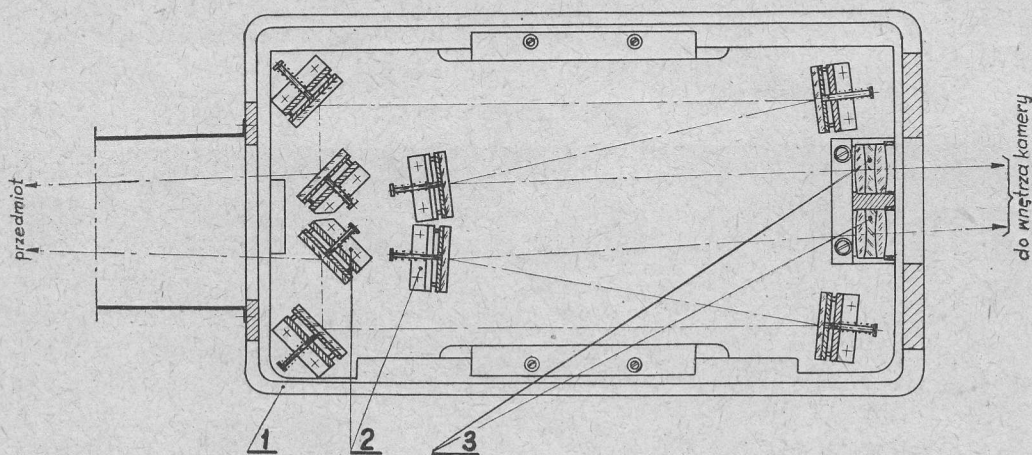
Zwierciadła galerii 6 mocowane są do korpusu za pośrednictwem specjalnych imadeł umożliwiających ich obrót podczas justowania wokół trzech prostopadłych osi. Regulacja ta musi zapewnić ustawienie osi optycznej zwierciadła z dokładnością przynajmniej 0,1 mm (w płaszczyźnie filmu), co narzuca niezwykle ostre wymagania odnośnie precyzji wykonania imadeł (rzędu mikrona). Te wymagania są trudne do spełnienia. Aby im sprostać przewidziano kombinację śrub drobnozwojowych i dźwigni o dużym przełożeniu, współpracującymi ze sprężynami kasującymi luzu. Osobnym zagadnieniem było zapewnienie dostatecznej jakości zwierciadłom galerii. Ze względu na duży promień krzywizny (326 mm) oraz wydłużony kształt (wymiary: 7,5 mm × 30 mm) konieczne było wykonanie ich ze stosunkowo grubych płytek (10 mm) aby uniknąć błędów astygmatyzmu**).

*) Tzw. „silumin”, cecha AK-9-LP-T₁20.

**) Tym błędem obarczona była próbna seria cieńszych zwierciadełek paczonych wyzwalającymi się w szkle naprężeniami.

Zwierciadła wirujące (wymiary: $12\text{ mm} \times 12\text{ mm}$) zamocowane zostały na wirniku 7 znajdującym się na wale silnika elektrycznego szeregowego o prędkości obrotowej regulowanej układem z autotransformatorem. Jak wspomniano, maksymalna prędkość wynosi 400 obr/s. Pomiar tej prędkości dokonywany jest fotoprzetwornikiem 8 generującym impulsy przy przejściu szczeliny w tarczy wirnika między elementami fotoprzetwornika. Układ ten może być dodatkowo wykorzystany do synchronizacji, jeśliby ujawniła się jej potrzeba. Silnik spoczywa w gnieździe w centrum korpusu za pośrednictwem podkładek tłumiących 9. Niewielkie drgania silnika oraz luzy w łożyskach (kulkowych) nie mają wpływu na jakość obrazu, ponieważ jest on rysowany przy jednym obrocie wirnika.

Na prawym skraju rysunku 3 widoczny jest fragment zespołu obiektywowego 4, pokazanego w całości na rys. 4. W korpusie 1 (też wykonanym z odlewu aluminium) umieszczone są obiektywy 3 wraz ze zwierciadłami skracającymi odległość między przedmiotem i kamerą oraz nakierowujące osie optyczne obiektywów na jeden punkt. Obiektywy (każdy składa się z trzech soczewek) zostały także zaprojektowane w Instytucie Fizyki Technicznej Politechniki Wrocławskiej. Użycie obiektywów typowych nie było



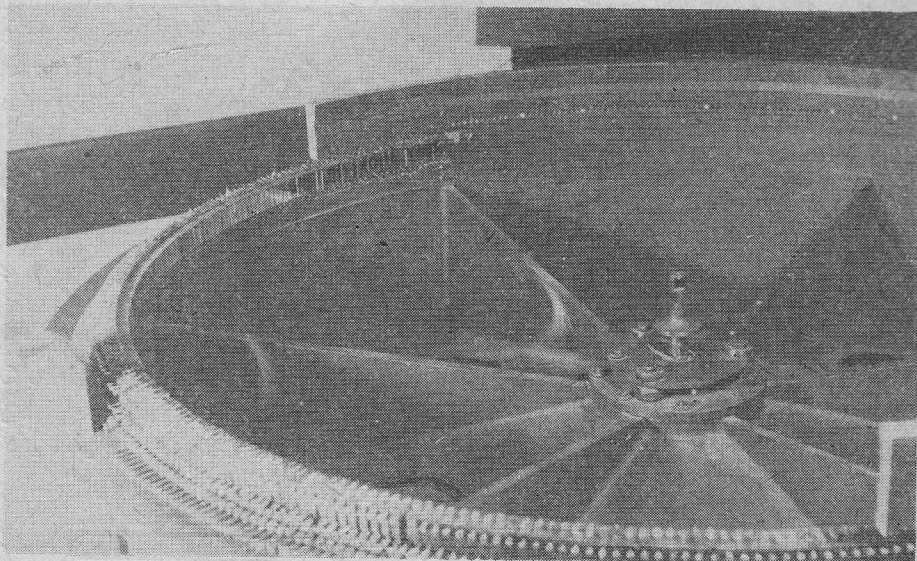
Rys. 4. Zespół obiektywowy

1 — korpus, 2 — zwierciadła płaskie, 3 — obiektywy

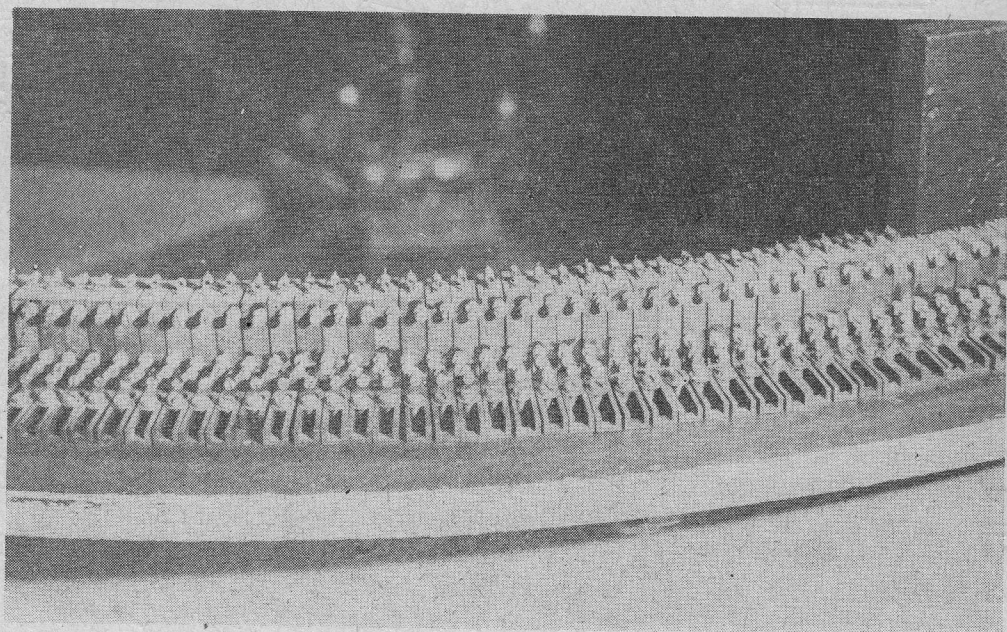
tu możliwe ze względu na specyficzne warunki pracy tego układu. Ogniskowa obiektywów wynosi 277 mm, średnica otworu 20 mm, co przy dużej drodze promienia świetlnego wewnątrz kamery daje bardzo mały otwór względny — około 1 : 50.

Wszystkie zwierciadła kamery wykonane są ze szkła napylanego aluminium. Ze względu na podniesienie trwałości i jakości powierzchni lustrzanych wskazane byłoby pokrycie ich warstwą kwarcu, ale obecnie technologia ta jest u nas trudno dostępna.

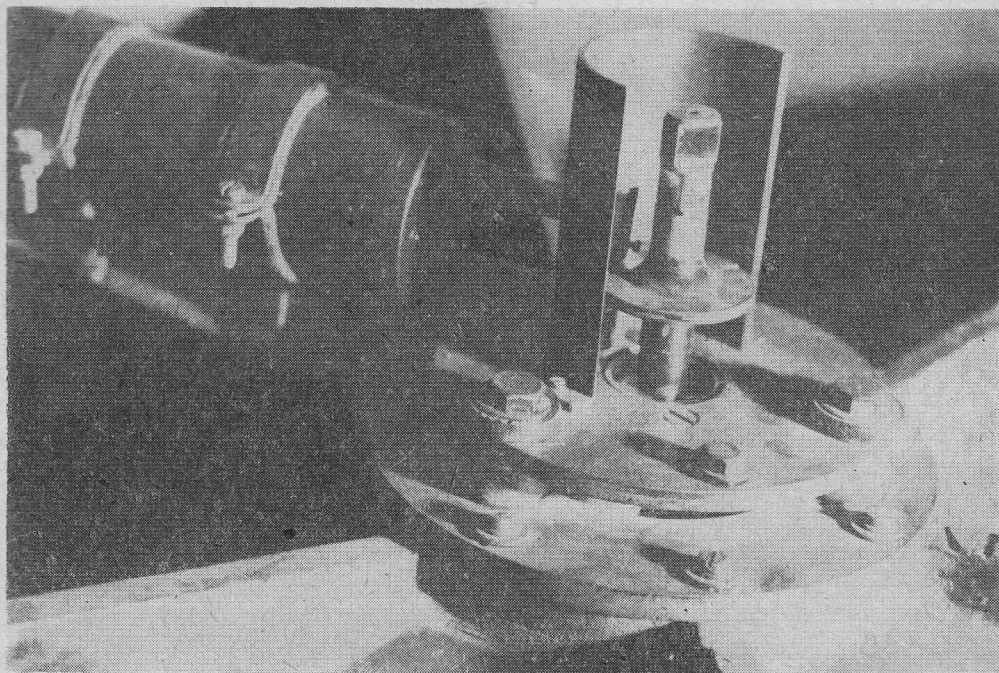
Kamera mieści ładunek filmu (16 mm) o długości $2 \times 10\text{ m}$. Na rys. 5 i 5a pokazano wewnątrz otwartej kamery z galerią zwierciadeł wklęsłych od strony imadeł regulacyjnych, a na rys. 6 centralne zwierciadło wirujące wraz z przetwornikiem fotoelektrycznym. Rys. 7 przedstawia widok zewnętrzny kamery.



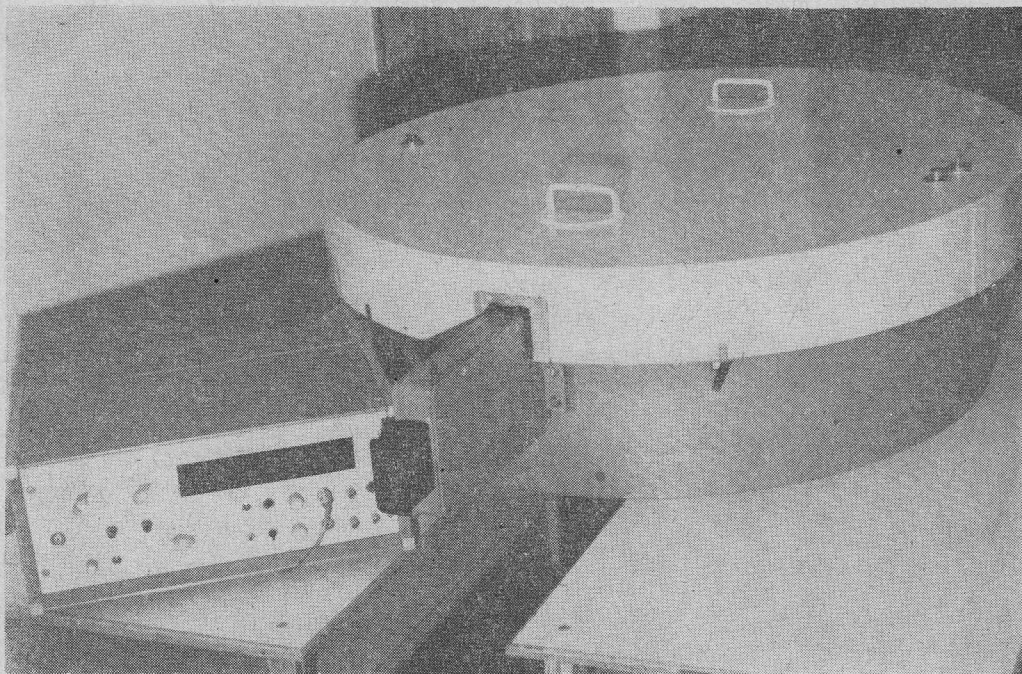
Rys. 5. Wnętrze kamery



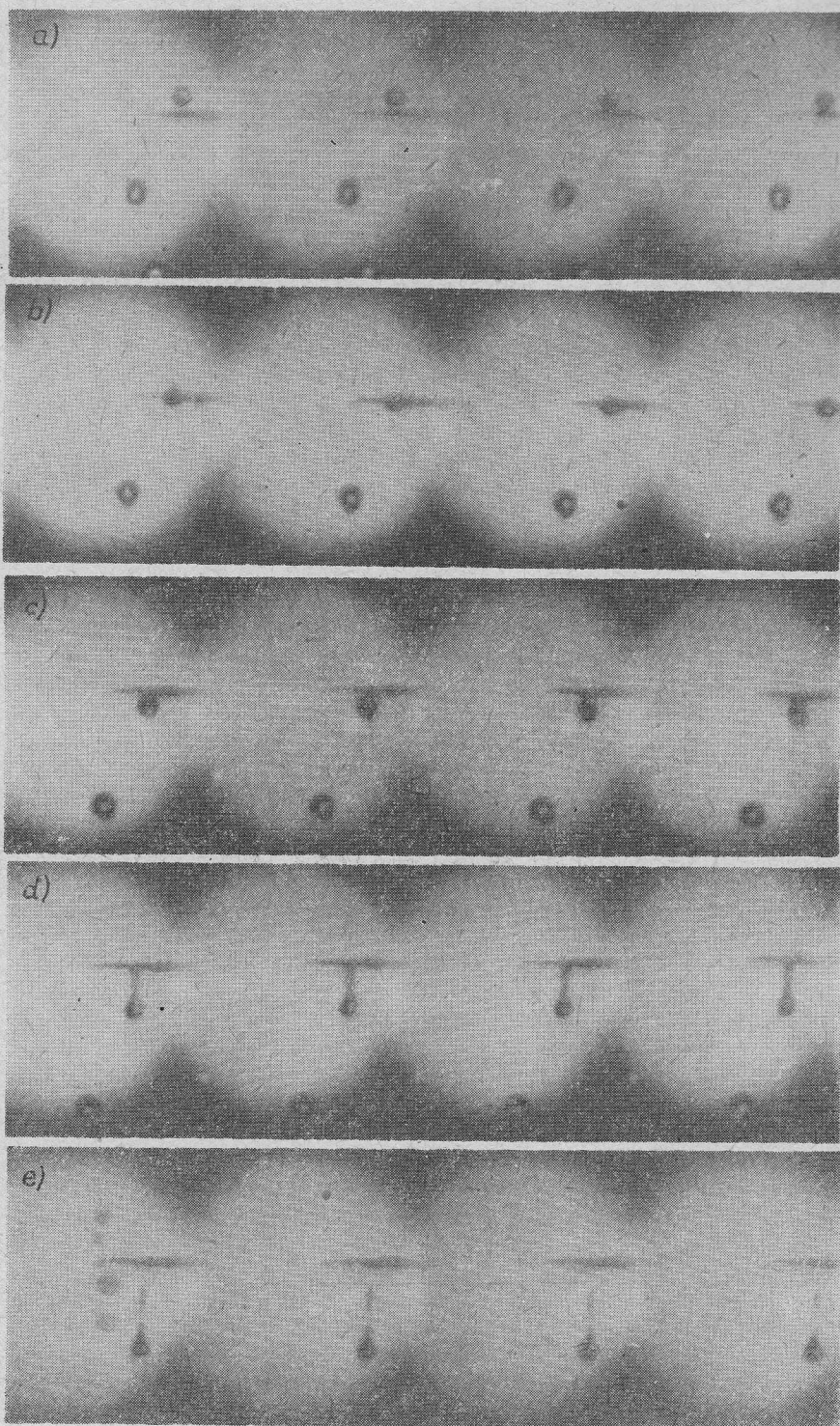
Rys. 5a. Wnętrze kamery — fragment galerii zwierciadeł wklęsłych od strony imadeł regulacyjnych



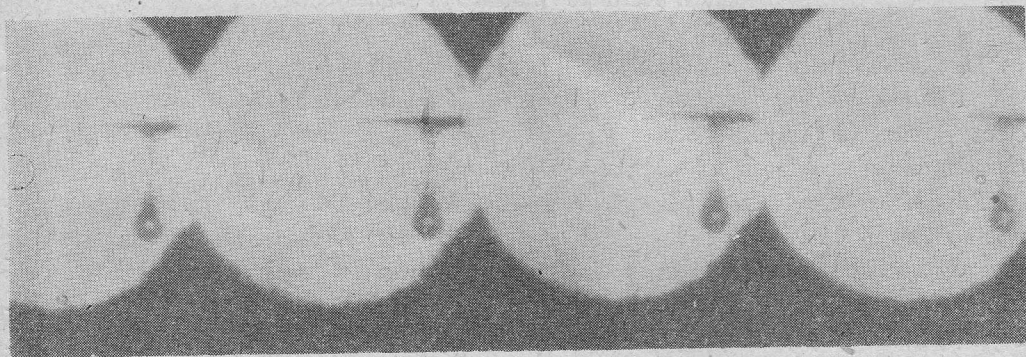
Rys. 6. Centralne zwierciadło wirujące z przetwornikiem fotoelektrycznym



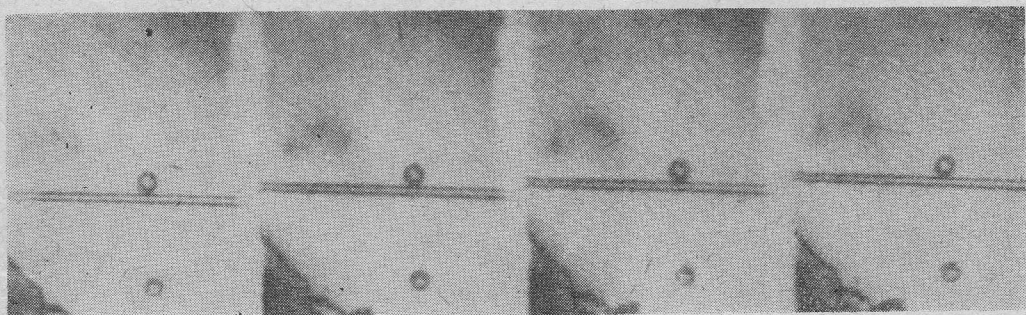
Rys. 7. Widok zewnętrzny kamery



Rys. 8a, b, c, d, e. Przebieg przenikania kropli przez ostrze ($v=64 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$)



Rys. 9. Przenikanie kropli przez ostrze ($v = 150 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$)



Rys. 10. Kropla i struga przed kolizją ($v = 150 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$)



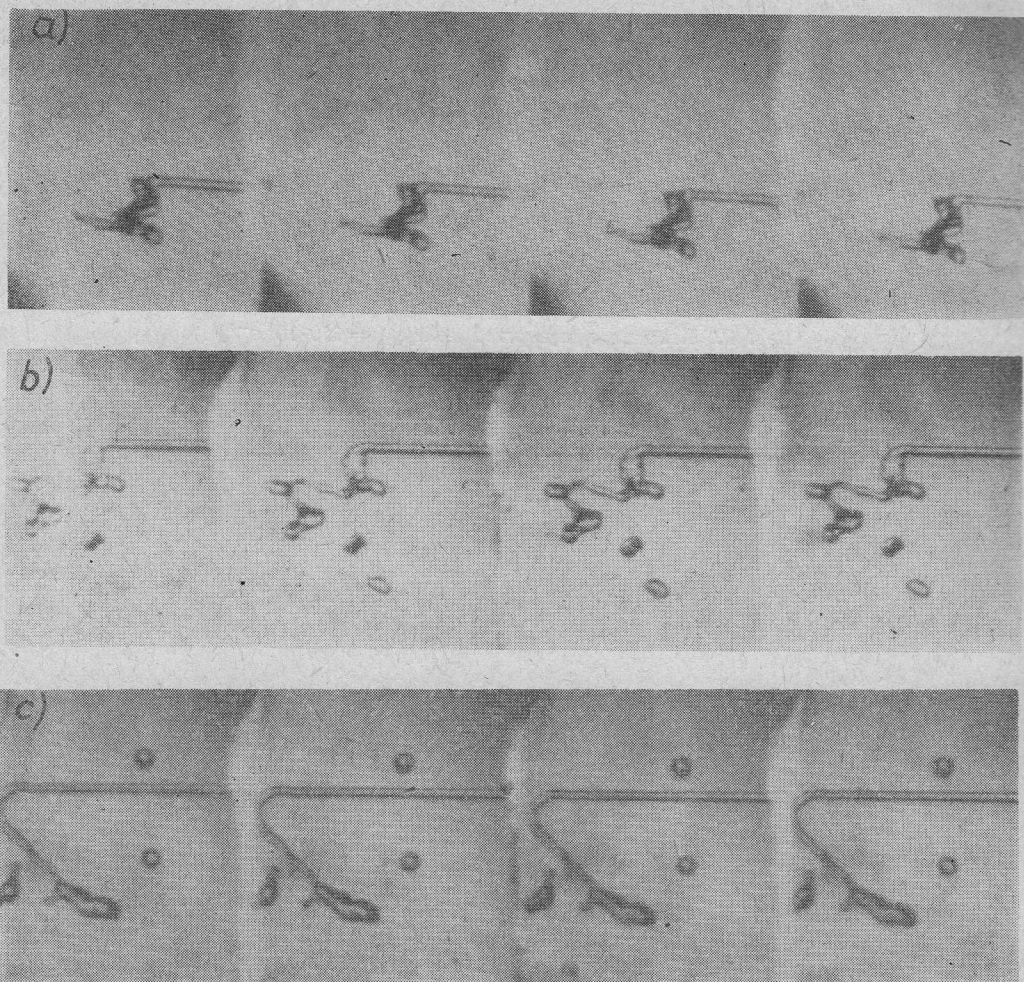
Rys. 11a, b. Fragment zarejestrowanych obrazów kolizji kropli i strugi ($v = 100 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$)

4. Rezultaty testowania kamery

Dla zademonstrowania możliwości rejestracyjnych kamery zostaną niżej przedstawione jedne z pierwszych rezultatów zastosowania jej do badań zachowania się skupisk cieczy zmieniających dostatecznie szybko swoje formy. Oczywiście — w niniejszym opracowaniu — wyłącznie w aspekcie jakości rejestracji.

Reprodukowane fotografie (rys. 8 i 9) przedstawiają kilka 4-kadrowych sekwencji przenikania kropli wody przez ostrze stojące na jej drodze. Kropla została wygenerowana przez wymuszony akustycznie rozpad strugi wytryskiwanej z kapilary z prędkością około 5 m/s. Częstość filmowania wynosiła tu $64 \cdot 10^3$ oraz $150 \cdot 10^3$ kadr/s. Odstępy czasowe między kadrami ($\sim 7 \mu\text{s}$) na tym zdjęciu są zbyt małe dla uchwycenia jakiegokolwiek różnicy.

Ciąg następnych fotografii (rys. 10, 11, 12) wydaje się być bardziej urozmaicony. Przedstawia on kolizję poziomu wytryskiwanego strumienia wody (prędkość ok. 5 m/s)



Rys. 12a, b, c. Efekty końcowe kolizji kropli i strugi (a, b — $v = 150 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$; c — $v = 200 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$)

z kroplami generowanymi jak wyżej. Podane tu sekwencje, wykonane przy różnych częstotliwościach filmowania, pozwalają śledzić proces rwania strugi przez kroplę i powstawanie form nowych, w rezultacie takiej kolizji.

Wypracowanie informacji ilościowych na temat czasów charakterystycznych fluktuacji czy prędkości deformacji w badaniach znacznie intensywniejszych procesów rozpadu form cieczy jest możliwe przy użyciu omawianej kamery nawet z niezłymi dokładnościami*).

Przedstawione wyżej zdjęcia wykonane zostały przy świetle lampy błyskowej (o energii impulsu ok. 200 J i czasie trwania ~ 1 ms) ustawionej naprzeciwko obiektywu tak, że obiekt filmowany znajdował się na tle skoncentrowanego błysku. Taka technika zdjęć jest tu jedyną możliwą do zastosowania wobec krótkich czasów ekspozycji i małej jasności obiektywów. Dla omawianej kamery minimalną energię błysku potrzebną do zaczernienia jednego kadru filmu o czułości 27 DIN oceniono na około $0,5 \div 1$ J. Limituje ona aktualne możliwości kamery zmuszając do szukania intensywniejszych źródeł światła. Obecnie przygotowwany jest układ oświetlający o energii błysku około 1000 J, który zapewne usunie to ograniczenie. Nie istnieje ono przy filmowaniu niektórych jaskrawych obiektów samoświecących, występujących np. w procesach spalania, wyładowań elektrycznych itp. Dla rejestracji takich przebiegów można byłoby podnieść częstotliwość filmowania kamery zastępując silnik elektryczny turbiną powietrzną, nie obawiając się jednocześnie niedostatku energii świetlnej niezbędnej do uzyskania obrazów fotograficznych na filmie.

Praca wpłynęła do Redakcji w lutym 1973 r.

Literatura

- [1] E. Wnuczak, S. Krzeczowski, *Camera for high speed cinematography*, Optica Applicata, III/1, Wrocław 1973.
- [2] E. Wnuczak, Zeszyty Naukowe Politechniki Wrocławskiej, Fizyka I, Nr 35, str. 49 - 72, 1960.
- [3] E. Wnuczak, Dysertacja doktorska, Wrocław 1961.
- [4] C. D. Miller, Nat. Advisory Committee for Aeronautics Technical, June 10/1947.
- [5] C. D. Miller, Journ. of the SMPTE 53, 473, 1949.

Конструкция камеры для быстрой кинематографии

Резюме

В работе представлены идея и конструкция камеры для быстрой кинематографии, а также некоторые из первых результатов ее применения.

Камера принадлежит к группе вторично многообъективных камер с вращающимся зеркалом (рис. 1), но с таким различием, что роль вторичных объективов, отображающих на фотопленке посредственный образ, произведенный в оси вращающегося зеркала ZW , исполняют вогнутые

*) Uzyskiwano obrazy o ostro zarysowanych konturach z przeszło 10-krotnymi powiększeniami w stosunku do filmowanego obiektu.

зеркала ZS (схема камеры, рис. 2). Применение здесь вогнутых зеркал позволяет регистрировать образ на кинематографической пленке, которую можно непосредственно употреблять для проекции без необходимости копирования, что является преимуществом редко встречаемым относительно камер такой быстроты. Техническую реализацию представленной идеи иллюстрируют рис. 3 и снимки 5 - 7 (на рис. 3: ротор с зеркалами — 3, галерея вогнутых зеркал — 2, пленки — 6, объективный состав — 4). На рис. 8 - 12 представлены результаты применения камеры в исследованиях флуктуации форм жидкости (рис. 8,9 — переход капли через лезвие, рис. 10, 11, 12 — коллизия капли со струей при абсолютных скоростях струи и капель около 5 м/сек).

Данные камеры:

- максимальная частота — ок. 320 000 кадров/сек;
- емкость камеры — ок. 400 кадров;
- масштаб отображения образа на негативе — 1 : 0,8.

Design of a Multi-Speed Film Camera

Summary

An idea and design of a multi-speed film camera together with the first results of its use are presented in the paper.

The camera is of the secondary multi-lens type with a rotating mirror (Fig. 1), where the secondary lenses projecting an intermediate image produced in the plane of the axis of the rotating mirror ZW onto the film are substituted by concave mirrors ZS (see camera diagram — Fig. 2). The use of the concave mirrors makes it possible to produce film pictures ready for projection without copying. This is an advantage rarely seen in cameras of such speeds.

The above idea was realized in the way as shown in Fig. 3 and photographs — Figs 5 - 7. (Fig. 3: rotor with mirrors — 3, concave mirrors gallery — 2, films — 6, lens assembly — 4). Results of applying the camera to the observation of the fluctuation of liquid shapes are presented in Figs 8 - 12 (Figs 8, 9 — drop passing a spike, Figs 10, 11, 12 — drop-stream collision at absolute speeds of both equal to about 5 m/sec).

Characteristic data of the camera:

- maximum rate: about 320,000 frames per second;
- capacity of the camera: 400 frames;
- object — negative image projection scale: 1 : 0.8.