

Tomasz Dyakowski, Jerzy Stefański

Instytut Techniki Ciepłej  
Politechniki Warszawskiej

## OKREŚLANIE RODZAJU RUCHU FALOWEGO WARSTWY CIECZY Z ANALIZY ZMIAN W CZASIE JEJ GRUBOŚCI

W pracy określano współczynnik autokorelacji z funkcji opisującej zmiany grubości warstwy spływającej cieczy. Na podstawie współczynnika autokorelacji wyróżniono ruch warstwy z falami okresowymi oraz jej ruch turbulentny.

### 1. WSTĘP

Opis ruchu falowego, spływającej grawitacyjnie po powierzchni pionowej warstwy cieczy, ma bogatą literaturę przedstawioną między innymi w pracach [1], [2], [3]. Obejmuje ona określanie średniej grubości warstwy cieczy, prędkości uśrednionej oraz długości i prędkości fazowej fal występujących na powierzchni warstwy cieczy.

Charakter ruchu powierzchni spływającej warstwy cieczy zależy zasadniczo od wielkości strumieni objętościowych. Na rys.1 przedstawiono obraz powierzchni warstwy cieczy dla wybranych wartości strumieni objętościowych, odniesionych do jednostkowej szerokości powierzchni, po której spływa warstwa. Dla strumienia mniejszego od  $2,22 \cdot 10^{-4} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \frac{1}{\text{m}} \right]$  na powierzchni warstwy występują grupy fal powtarzające się okresowo. Każda z grup zawiera fale przetaczające oraz fale ka-

Tomasz Dyakowski, Jerzy Stefański

Instytut Techniki Ciepłej  
Politechniki Warszawskiej

## OKREŚLANIE RODZAJU RUCHU FALOWEGO WARSTWY CIECZY Z ANALIZY ZMIAN W CZASIE JEJ GRUBOŚCI

W pracy określano współczynnik autokorelacji z funkcji opisującej zmiany grubości warstwy spływającej cieczy. Na podstawie współczynnika autokorelacji wyróżniono ruch warstwy z falami okresowymi oraz jej ruch turbulentny.

### 1. WSTĘP

Opis ruchu falowego, spływającej grawitacyjnie po powierzchni pionowej warstwy cieczy, ma bogatą literaturę przedstawioną między innymi w pracach [1], [2], [3]. Obejmuje ona określanie średniej grubości warstwy cieczy, prędkości uśrednionej oraz długości i prędkości fazowej fal występujących na powierzchni warstwy cieczy.

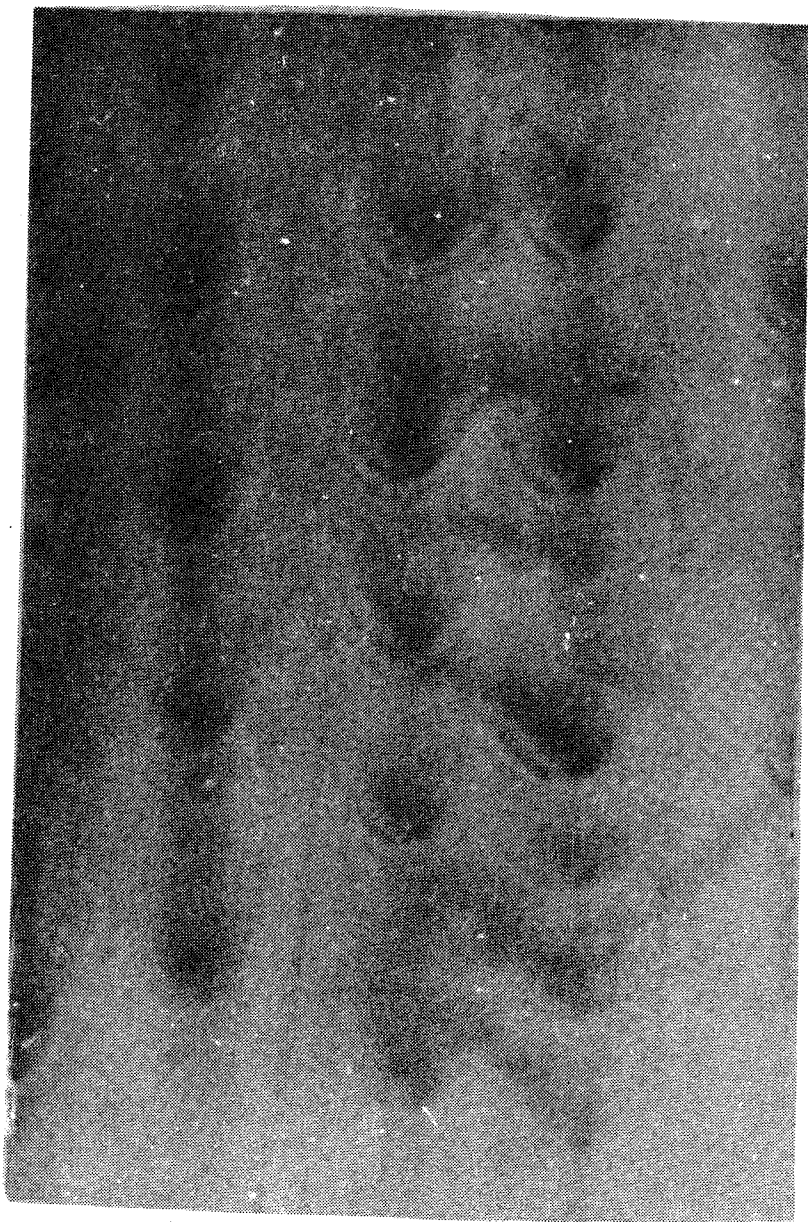
Charakter ruchu powierzchni spływającej warstwy cieczy zależy zasadniczo od wielkości strumieni objętościowych. Na rys.1 przedstawiono obraz powierzchni warstwy cieczy dla wybranych wartości strumieni objętościowych, odniesionych do jednostkowej szerokości powierzchni, po której spływa warstwa. Dla strumienia mniejszego od  $2,22 \cdot 10^{-4} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \frac{1}{\text{m}} \right]$  na powierzchni warstwy występują grupy fal powtarzające się okresowo. Każda z grup zawiera fale przetaczające oraz fale ka-

pilarne i w ramach grupy wyznaczyć można ich długość, amplitudę i prędkość fazową. Ponadto, dla podanych wyżej wartości strumienia cieczy zmiany grubości warstwy w dowolnym punkcie powierzchni w funkcji czasu są okresowe. Zwiększenie strumienia ponad podaną wyżej wartość powoduje jakościową zmianę ruchu warstwy. Zmiana ta jest wynikiem utraty stateczności ruchu warstwy z falami okresowymi. Utrata stateczności przejawia się przypadkową iterferencją fal na powierzchni warstwy, a dalszy wzrost strumienia cieczy prowadzi do intensyfikacji tego zjawiska. Zmiany grubości warstwy dla tych wielkości strumieni cechuje przypadkowość wywołana charakterem pojawiających się fal na jej powierzchni, będących wynikiem ruchu turbulentnego warstwy.

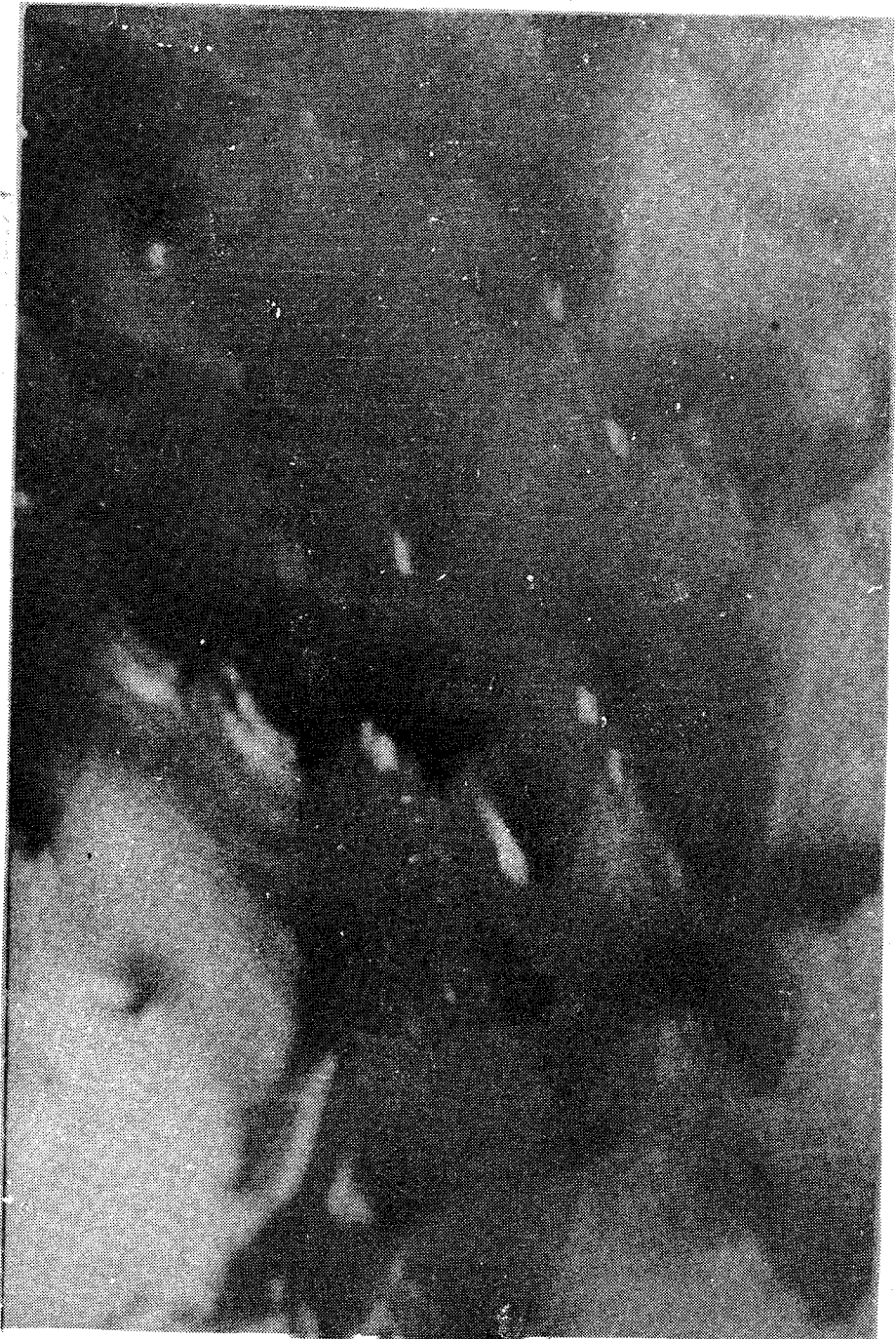
## 2. CEL PRACY I ZASADA POMIARU

W literaturze ocena rodzaju ruchu falowego warstwy cieczy przeprowadzana jest przez pomiar takich uśrednionych po czasie wielkości opisujących ten ruch jak: prędkość i grubość warstwy w funkcji liczby  $Re_L$  ( $Re_L = \frac{F}{\nu_L}$ , gdzie:  $F$  - strumień objętościowy/jedn. szer. płyty;  $\nu_L$  - lepkość). Dane ilościowe przedstawione między innymi w pracach [2], [3] wskazują na szeroki przedział wartości liczby  $Re_L$ , przy których występuje ruch warstwy z falami powstającymi przypadkowo na jej powierzchni (400 ÷ 3200).

Z uwagi na występowanie na powierzchni warstwy fal o różnych amplitudach - począwszy od małych charakterystycznych dla fal kapilarnych, aż do dużych charakterystycznych dla fal przetaczających - podjęto próbę opisu rodzaju ruchu falowego warstwy cieczy przez analizę mierzonej w określonym punkcie powierzchni zmiany jej grubości w funkcji czasu. W tym celu użyto stosowanej w opisie procesów przypadkowych funkcji autokorelacji. Funkcje autokorelacji są szeroko stosowane w opisie przepływów turbulentnych, drgań stochastycznych, progno-



Rys.1a. Obraz powierzchni warstwy dla: a)  $Re_{L1} = 220$



Rys.1b. Obraz powierzchni warstwy: b)  $Re_{L2} = 496$

zowaniu pogody. Okazuje się, że mogą one być także kryterium rodzaju ruchu warstwy, co stanowi przedmiot niniejszej pracy.

Wyznaczenie funkcji autokorelacji polegało na zarejestrowaniu na taśmie magnetycznej sygnałów elektrycznych stanowiących miarę zmian grubości warstwy i następnie przeprowadzenie ich analizy na urządzeniu analogowym.

Jak wiadomo, funkcja autokorelacji dla zjawisk okresowych opisanych jedną harmoniczną ( $h(t) = h_0 \sin(\omega t)$ ) jest również funkcją o jednej składowej harmoniczej. W przypadku występowania większej liczby składowych harmoniczych funkcja autokorelacji dąży do zera wraz ze wzrostem przesunięcia czasowego. Należało się spodziewać, że w miarę zwiększania się charakteru przypadkowego ruchu falowego powierzchni cieczy, a co za tym idzie zwiększanie się charakteru przypadkowego zmian grubości warstwy cieczy odpowiadający im przebieg funkcji autokorelacji utraci okresowość i funkcja autokorelacji będzie coraz intensywniej dążyć do zera.

### 3. UKŁAD DO WYZNACZANIA FUNKCJI AUTOKORELACJI

W przedstawianej pracy określano unormowaną w przedziale  $(-1, 1)$  wartość funkcji autokorelacji, nazywaną dalej współczynnikiem autokorelacji. Współczynnik ten wyznaczano z zależności:

$$R = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \frac{\overline{h(t)h(t+\tau)}}{\sqrt{\overline{h^2(t)}} \sqrt{\overline{h^2(t+\tau)}}},$$

gdzie:

$h(t)$  - zmiana w czasie grubości warstwy cieczy,

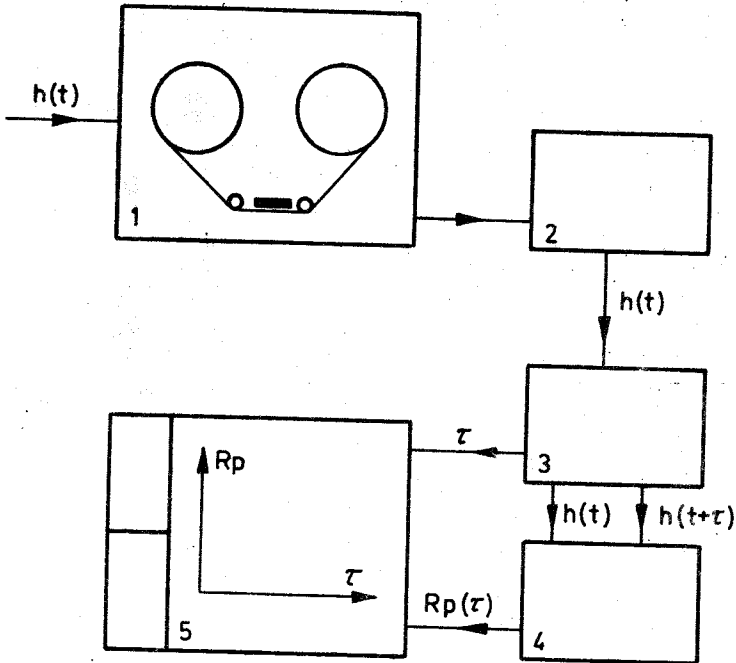
$\tau$  - czas przesunięcia,

$T$  - czas uśredniania,

$\overline{h^2(t)}$ ;  $\overline{h^2(t+\tau)}$  - średnie odchylenie kwadratowe.

W pracy zrealizowano układ do wyznaczania współczynnika autokorelacji wg schematu przedstawionego na rys.2. Napięcie-

wy sygnał wejściowy na magnetofon pomiarowy 1 stanowił miarę zmian w czasie grubości warstwy cieczy. Otrzymywano go przez pomiar grubości warstwy metodą absorpcji światła. Opis metody i stanowiska pomiarowego przedstawiono w pracy [4]. Béz-



Rys.2. Schemat stanowiska do wyznaczania współczynnika autokorelacji

pośrednio za magnetofonem umieszczono filtr dolnoprzepustowy 2, który działał w paśmie  $0 \div 200$  Hz. Filtr ten nie przepuszczał szumów napięciowych o wyższej częstotliwości wytworzonych przez układ rejestracji i odtwarzania sygnału. Przesuwanie jednego sygnału względem drugiego i dyskretne wartości realizowano przez jednostkę opóźniającą 3. Dla wartości  $\tau$  wyznaczano korelatorem 4 wartość współczynnika autokorelacji i zapisywano na rejestratorze pisakowym 5. Względny błąd rysowania przebiegu współczynnika autokorelacji przez pisak wynosił zgodnie z [5]:  $\delta_R < 10^{-3}$ .

Błąd uśredniania związany z wyborem skończonej wartości czasu uśredniania zmniejszano przez zmianę prędkości odtwarzania zarejestrowanego sygnału względem prędkości rejestracji.

Sygnal napięciowy rejestrowano na taśmie, która poruszała się z prędkością 46,5 mm/s, a następnie przy wyznaczaniu współczynnika autokorelacji odtwarzano go przy prędkości dziesięciokrotnie większej. Jak wynika z instrukcji [5] dla przyjmowanego w badaniach czasu uśredniania  $T = 30$  s względny błąd uśredniania  $\delta_T < 10^{-2}$ .

#### 4. ZAKRES BADAŃ I UZYSKANE WYNIKI

Badania przeprowadzono w zakresie zmian strumienia objętościowego spływającej cieczy  $2,22 \div 10 \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \frac{1}{\text{m}} \right]$ . Z uwagi na możliwość oddziaływania warunków wlotowych pomiary wykonano w znacznej odległości od krawędzi wlotowej.

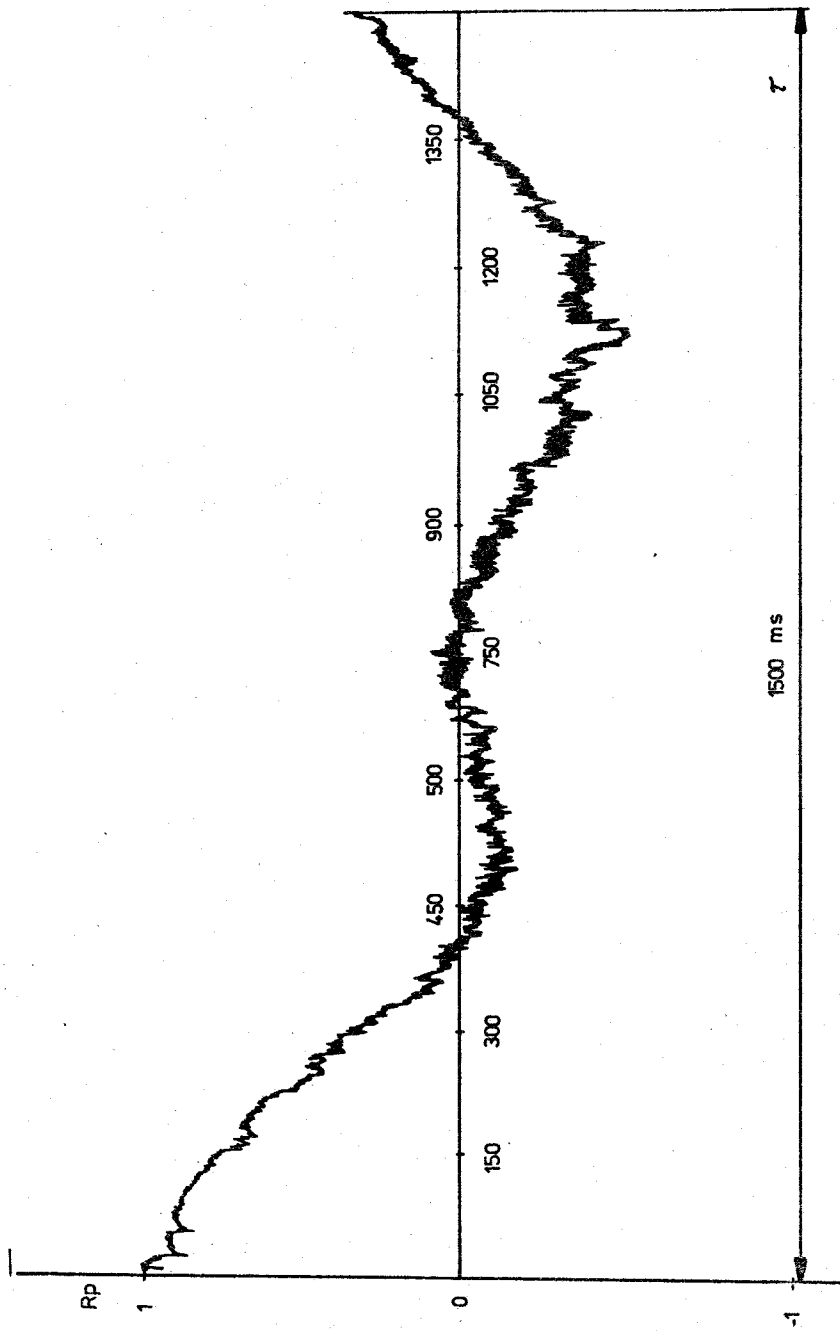
Niezależnie od przeprowadzonych pomiarów dla wyznaczenia współczynników autokorelacji dokonano rejestracji fotograficznej obrazu powierzchni warstwy cieczy. Obraz powierzchni warstwy cieczy rejestrowano fotograficznie dla tych wartości strumienia cieczy, dla których przeprowadzono pomiar współczynnika autokorelacji.

Uzyskane przebiegi współczynników autokorelacji przedstawiono na rys.3. Graficzne obrazy zmian współczynników autokorelacji w funkcji czasu przesunięcia okazały się jakościowo zgodne z rodzajami rejestrowanych fotograficznie ruchów warstwy cieczy i zależały od wielkości strumieni objętościowych wpływającej cieczy.

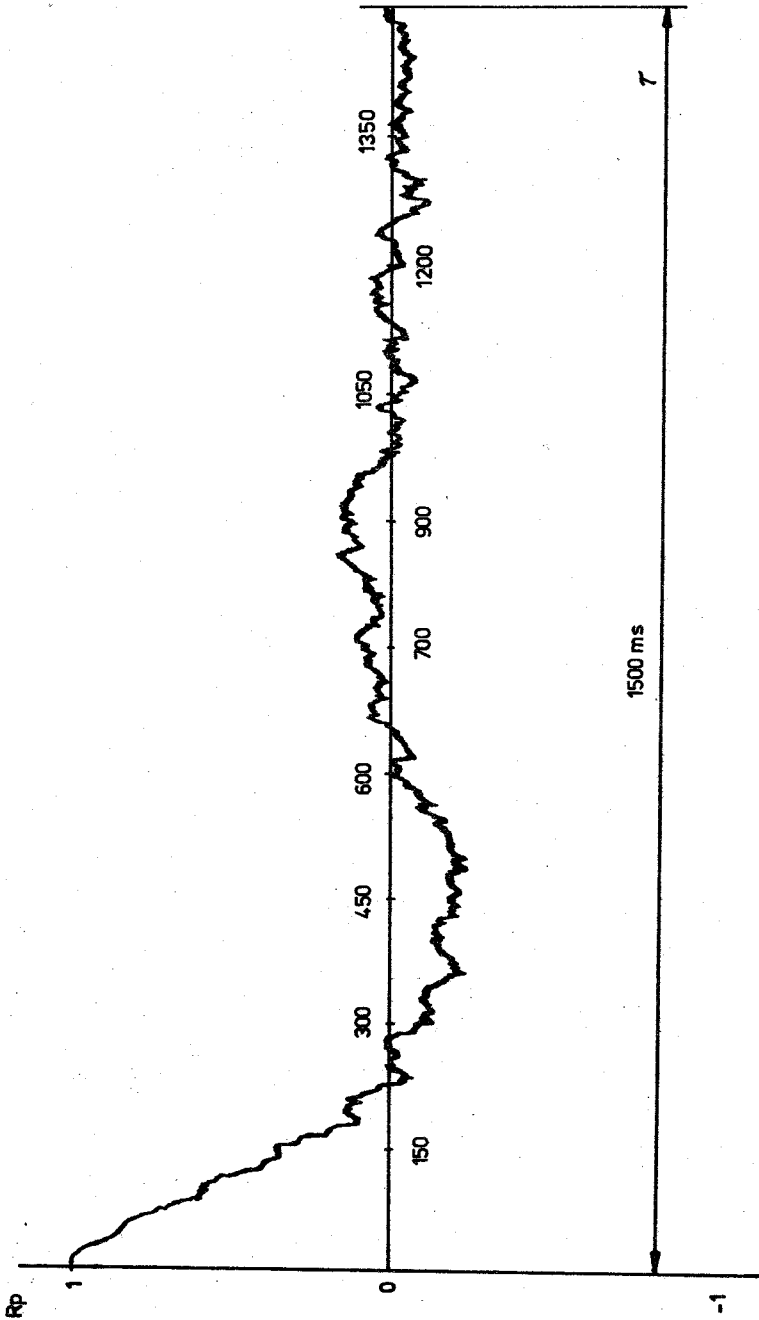
Dla strumienia mniejszego od  $2,22 \cdot 10^{-4} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \frac{1}{\text{m}} \right]$  współczynnik autokorelacji zmieniał się okresowo. Przy wzroście strumienia wartość współczynnika dla odpowiednio dużych wielkości czasu przesunięcia dążyła do zera. Czas przesunięcia zmniejszał się wraz ze wzrostem strumienia cieczy dla pewnej wartości granicznej. Dla strumieni cieczy większych od  $5,03 \cdot 10^{-4} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \frac{1}{\text{m}} \right]$  wartość czasu przesunięcia była stała.

Z analizy otrzymanych przebiegów współczynnika autokorelacji wynika, że istnieją dwie charakterystyczne wartości





Rys. 3a. Współczynnik autokorelacji ( $R_p$ ) dla: a)  $Re_{L1} = 220$



Rys. 3b. Współczynnik autokorelacji ( $R_p$ ) dla: b)  $Re_{12} = 496$

strumienia cieczy określające rodzaj ruchu warstwy. Pierwsza z nich wskazuje na następowanie utraty stateczności ruchu warstwy z falami okresowymi. Druga wartość strumienia cieczy wskazuje, że pojawianie się fal ma charakter całkowicie przypadkowy.

Pierwszą z charakterystycznych wartości strumienia można również wyznaczyć przez pomiar zmian grubości warstwy. Wyznaczanie drugiej charakterystycznej wartości strumienia wymaga natomiast wprowadzenie pewnego kryterium będącego miarą tego czy ruch turbulentny warstwy jest w pełni rozwinięty. W pracy jako takie kryterium przyjęto niezależność granicznej wartości czasu przesunięcia od wydatku cieczy.

Na podstawie przedstawionych na rys.3 autokorelacji wartości liczby  $Re_L$  charakteryzujące ruch warstwy z falami okresowymi i przypadkowymi wyniosły odpowiednio:  $Re_{L1} = 220$  i  $Re_{L2} = 496$ .

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Voroncov E.G., Tananajko Ju.M.: Teploobmen v zhidkostnykh pljokach. Technika. Kiev 1972.
- [2] Cveļodub O.Ju.: Issledovanije gidrodinamičeskich ustrojčivosti tečenija v dvuchfaznych sredach. Praca doktorska. Novosibirsk 1978.
- [3] Portalski S., Cleeg A.J.: An experimental strudy of wave inception on falling liquids films. CES 1972, v.27, No 6, pp 1257-1265.
- [4] Dyakowski T., Stefański J.: Metoda i stanowisko do punkowego pomiaru zmiennej w czasie grubości filmu cieczy spływającego po płaskiej płycie. Biuletyn ITC PW nr 47, Warszawa 1977.
- [5] Instruction manual for type PD-70 analog correlator - ed. by DISA 1968.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВИДА ВОЛНОВОГО ДВИЖЕНИЯ СЛОЯ ЖИДКОСТИ  
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АНАЛИЗА ИЗМЕНЕНИИ ВО ВРЕМЕНИ  
ТОЛЩИНЫ СЛОЯ**

**К р а т к о е   с о д е р ж а н и е**

В работе определяется коэффициент автокорреляции по функции, определяющей изменение толщины слоя стекающей жидкости. По коэффициенту автокорреляции определяется ламинарное движение с периодическими волнами, а также турбулентное движение жидкости.

**THE QUALIFICATION OF THE KIND OF WAVY MOTION OF LIQUID  
LAYER BY ANALYSIS OF CHANGES OF ITS THICKNESS IN TIME**

**S u m m a r y**

The autocorelation coefficient calculated from function describing the change of thickness of liquid layer was obtained. The values of the autocorelation coefficient allowed to characterize the motion of the layer with periodic waves and its turbulent motion.

Rękopis dostarczone

w listopadzie 1980 r.