

JERZY ONOSZKO

TRANSPORT MASOWY W RUCHU FALI WYMUSZONEJ W ŚWIETLE BADAŃ LABORATORYJNYCH

(tabl. XVII, XVIII i 1 fig.)

Mass Transport in Forced Wave Motion in Laboratory Investigation

(Pl. XVII, XVIII and 1 Fig.)

I. WSTĘP

Zagadnieniem transportu materiału dennego w strefie brzegu morskigo interesują się od wielu lat zarówno geolodzy, jak i hydraulicy. Badania geologiczne, prowadzone wyłącznie w naturze, dotyczą przede wszystkim analizy zjawiska kompleksowego, mając na celu określenie zasadniczych jego prawidłowości. Hydraulicy analizują zjawisko bardziej szczegółowo, poszukując nie tylko jakościowej, ale także i ilościowej współzależności pomiędzy poszczególnymi parametrami badanego zjawiska. Przeprowadzają oni swoje badania zarówno w warunkach naturalnych, jak i laboratoryjnych.

W skład ogólnego zjawiska transportu materiału wchodzi: odspojenie ziarn od dna, ich przemieszczenie jak też sedymentacja. O ile odspojenie ziarna jest wynikiem chwilowych prędkości dennych, to przemieszczenie i osiadanie ziarna jest efektem średniej w czasie prędkości unoszenia. Aby przemieszczenie ziarna mogło wystąpić, musi istnieć wypadkowy transport wody. W przypadku ruchu falowego transportem tym jest tzw. transport masowy, będący wynikiem wypadkowego przemieszczenia cząstek wody w ciągu pełnego okresu oscylacji.

W ramach niniejszej pracy ograniczymy się jedynie do przypadku nie załamanej fali monochromatycznej. Należy podkreślić, że w naturze mamy z reguły do czynienia nie z falą regularną, lecz z mniej lub więcej rozwiniętym widmem falowym, złożonym z szeregu fal o różnych charakterystykach. Przebadanie więc zjawiska fali monochromatycznej praktycznie może mieć miejsce wyłącznie w warunkach laboratoryjnych.

II. TRANSPORT MASOWY FALI SWOBODNEJ W ŚWIETLE TEORII

Zanim przejdziemy do analizy wymuszonej fali wiatrowej (pod tym pojęciem rozumiemy falę istniejącą w trakcie działania wiatru na swobodną powierzchnię wody), rozpatrzmy zagadnienie transportu masowego fali swobodnej (fala swobodna — fala istniejąca bez aktualnie działającego na jej profil wiatru, np. w naturze — fala istniejąca po ustaniu wiatru lub fala powstała w obszarze sąsiednim do obszaru działania wiatru).

Transportem masowym w ruchu falowym nazywamy poziome, wypadkowe przemieszczenie cieczy. Jest ono różnokierunkowe w poszczególnych poziomach. W świetle analizy teoretycznej i doświadczalnej transport masowy jest funkcją względnej głębokości wody $\left(\frac{H}{L}\right)$, gdzie H — jest głębokością wody, L — długością fali), wysokości fali (h) oraz jej okresu (T). Stwierdzono, że kształt rozkładu w pionie prędkości transportu masowego uzależniony jest od parametru $\frac{H}{L}$, natomiast wielkość wektorów prędkości jest funkcją parametrów fali.

Na temat transportu masowego w ruchu fali swobodnej istnieje szereg prac teoretycznych (Stokes, Struik, Miche, Lhermitte, Longuet-Higgins, Dmitriew i in.) jak i doświadczalnych. Autor niniejszej pracy przeprowadził również doświadczenia w tym zakresie (J. Onoszko 1965).

We wszystkich dotychczasowych pracach wielkość prędkości transportu masowego fali swobodnej jest określana wzorem:

$$\bar{u}_z = \frac{(\pi h)^2}{4LT} \cdot f_z\left(\frac{H}{L}\right).$$

Powyższy wzór określa uśrednioną prędkość transportu masowego na głębokości z pod poziomem spokoju. Prędkość ta przybiera zarówno wartości dodatnie, jak i ujemne, w zależności od położenia w stosunku do poziomu wody. Poszczególni autorzy określają odmiennie funkcję $f_z\left(\frac{H}{L}\right)$. Najbardziej uznanym autorem w tym zakresie jest Longuet-Higgins (1953).

Longuet-Higgins rozpatrując ruch falowy cieczy lepkiej przyjmuje istnienie wirowości ruchu. Wirowość powstająca w obu warstwach granicznych, powierzchniowej i dennej, przenosi się w głąb masy cieczy bądź w efekcie kondukcji lepkości, bądź drogą konwekcji wzdłuż linii prądu. Zgodnie z rozwiązaniem kondukcji występujący w masie cieczy transport masowy jest ściśle uzależniony od wielkości wirowości ruchu, jak też i lepkości cieczy. Według Longuet-Higginsa pozioma prędkość transportu masowego na poziomie z pod swobodną powierzchnią wyraża się wzorem:

$$\bar{u}_z = \frac{h^2 K \sigma}{16sh^2 KH} \cdot \left\{ 2ch [2KH (\mu - 1)] + 3 - KH sh 2KH [3 (\mu^2) - 4 (\mu) + 1] + \right. \\ \left. + 3 \left(\frac{sh 2KH}{2KH} + \frac{3}{2} \right) \cdot [(\mu)^2 - 1] \right\}$$

gdzie: $K = \frac{2\pi}{L}$; $\sigma = \frac{2\pi}{T}$; $\mu = \frac{z}{H}$

W powyższym wzorze uwzględniony jest warunek, że w ramach całego przekroju pionowego nie występuje wypadkowe przemieszczenie masy wody, tj., że:

$$\int_0^H \bar{u}_z \cdot dz = 0$$

Na rysunku (fig. 1) przedstawione są według Longuet-Higginsa krzywe transportu masowego dla trzech wartości $KH = \frac{2\pi H}{L}$, równych 0,5; 1,0 i 1,5.

Zgodnie z powyższymi wykresami widać, że charakter przemieszczenia cieczy jest uzależniony od wielkości parametru KH . Przy swobodnej powierzchni dla większych wartości KH przemieszczenie to jest zgodne z kierunkiem fali, jednak dla $KH = 0,5$ posiada ono kierunek pod falę.

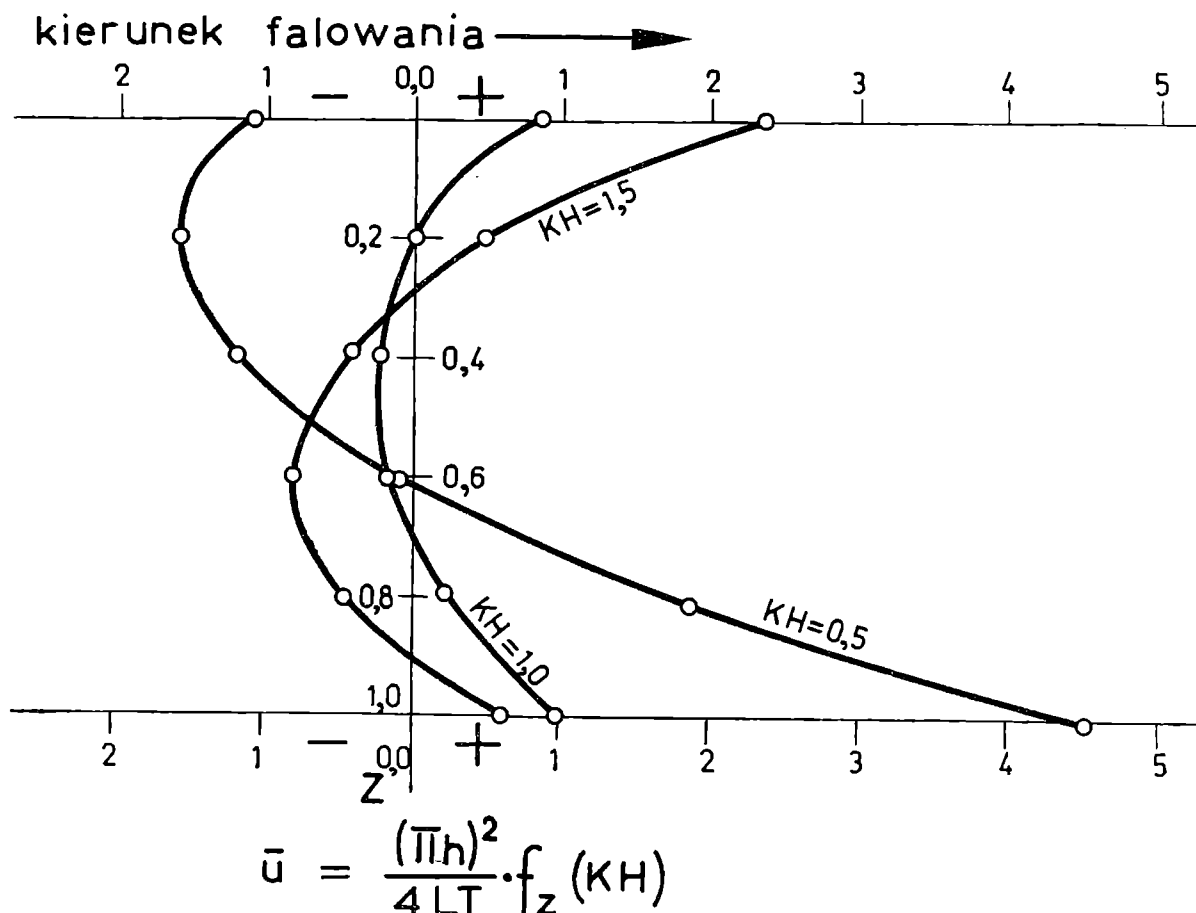


Fig. 1. Krzywe prędkości transportu masowego $f_z(KH)$ w ruchu fali swobodnej wg Longuet-Higginsa

Fig. 1. Velocity of mass transport in the swell $f_z(KH)$ (after Longuet-Higgins) (The arrow indicates direction of wave motion)

Przy dnie istnieje stałe przemieszczenie zgodne z kierunkiem fali. W środkowej części przekroju jest ono zawsze pod falę, z tym że położenie punktów zerowych jest uzależnione od wielkości KH .

Powyższy rozkład prędkości wypadkowego przemieszczenia cieczy tłumaczy również charakter transportu materiału ziarnistego w ruchu fali swobodnej. Ziarna cięższe, przenoszone w postaci wleczonej lub okresowo unoszone, zostają przemieszczane wraz z falą, przy czym bardziej intensywny ich transport występuje na mniejszych głębokościach względnych. Ziarna lżejsze, podniesione ponad dolny punkt zerowości, przenoszone są pod falę. Tym różnokierunkowym układem prędkości transportu masowego tłumaczy się występująca segregacja ziarn na profilu brzegowym.

III. BADANIA LABORATORYJNE TRANSPORTU MASOWEGO FALI SWOBODNEJ I WYMUSZONEJ

W przypadku fali wymuszonej (wiatrowej) transport masowy różni się znacznie od transportu masowego fali swobodnej. Działająca na swobodną powierzchnię składowa pozioma siły wiatru w efekcie tarcia wywołuje powstanie prądu dryfowego. Wartość prędkości tego prądu na swobodnej powierzchni określona jest eksperymentalnie dla przestrzeni nieograniczonej wzorem:

$$\bar{u}_d = 0,015 W,$$

gdzie W jest prędkością wiatru (Z. K o w a l i k, 1965).

W celu przeanalizowania charakteru przemieszczenia wody w ruchu fali wymuszonej autor niniejszej pracy wykonał serię doświadczeń laboratoryjnych w kanale falowym. W kanale tym wytwarzana była zarówno fala swobodna (przy pomocy mechanicznego wywoływacza fali), jak też wymuszona (na fale podstawową, wywołaną początkowo mechanicznie i już uformowaną działał wiatr o stałej prędkości). Doświadczenia przeprowadzono w kanale o wymiarach: długość — 15,2 m, szerokość — 0,65 m, wysokość — 0,70 m. Dno kanału było poziome, pokryte cienką warstwą żwiru o średnicy $\phi = 5,0$ mm. W doświadczeniach utrzymywano stałą głębokość wody równą 40 cm. Zmiennymi były parametry fali. Prędkość wiatru stosowano stałą, równą około 5,5 m/sek. Wiatr był wywoływany wentylatorem umieszczonym nad kanałem. Kanał był przykryty szczelnie na całej długości, z wyjątkiem odcinka nad wygaszaczem fali.

Pomiar prędkości przemieszczenia cząstek wody był wykonywany przez wprowadzenie do wody w kanale mieszaniny cieczy, posiadającej ciężar właściwy równy ciężarowi wody i w niej nie rozpuszczającej się. Składnikami tej mieszaniny były: trójchloroetylen (C_2HCl_3), czysta benzyna oraz niewielka domieszka bieli cynkowej. Zastosowana w doświadczeniach mieszanina tworzyła pojedyncze dobrze obserwowalne gołym okiem cząstki kuliste. Mierząc bezpośrednio lub rejestrując fotograficznie poziome przemieszczenie cząstek w znanym czasie określano średnią prędkość ich przemieszczenia. Załączone (Tabl. XVII, XVIII) zdjęcia wskazują przykładowo kinematykę ruchu fali.

Dwa pierwsze zdjęcia (tabl. XVII fig. 1, 2) przedstawiają ruch cząstek wody w ruchu fali swobodnej, dwa dalsze (tabl. XVIII fig. 1, 2) — w ruchu fali wymuszonej. Wyraźnie widoczna jest różnica w charakterze obu typów fal. Fale swobodne odznaczają się torami cząstek wody zbliżonymi do zamkniętych orbit, zmniejszających się i spłaszczających w miarę zagłębienia. W przypadku fal wymuszonych tory cząstek wody przy swobodnej powierzchni i przy dnie stanowią trochoidy z pętlami, takie, jakie zakreślają punkty leżące poza kołem toczącym się wzdłuż prostej. Posiadają one podłużne osie poziome. Wewnątrz cieczy tory cząstek są zdecydowanie nieregularne. Obserwowana jest wyraźna turbulencja ruchu.

W czasie doświadczeń przebadano 15 różnych fal, zarówno swobodnych, jak i z działaniem wiatru. Charakterystyka wytworzonych fal swobodnych wraz z pomiarami prędkości na swobodnej powierzchni jak i przy dnie podane są w tabeli Nr 1. W tabeli tej dla porównania podano również prędkości, wyliczone według wzoru *Longuet-Higginsa*.

Tabela (Table) 1

Charakterystyka generowanych fal swobodnych ($H = 40$ cm)
Characteristic of experimental swell ($H = 40$ cm)

N ^o	T sek.	h cm	L cm	KH	\bar{u}_0 cm/sek		\bar{u}_H cm/sek	
					pomierzone measured	teoretyczne theoretic	pomierzone measured	teoretyczne theoretic
1	0,65	2,5	70,0	3,59	1,15	3,54	0,00	+ 0,005
2	0,65	3,8	70,0	3,59	3,15	8,15	— 0,11	+ 0,012
3	0,65	4,0	70,0	3,59	4,05	13,0	— 0,15	+ 0,019
4	0,65	5,2	70,0	3,59	4,72	15,25	— 0,19	+ 0,022
5	0,65	5,5	70,0	3,59	4,87	17,05	— 0,20	+ 0,025
6	0,65	6,5	70,0	3,59	6,08	23,90	— 0,32	+ 0,035
7	0,80	1,3	98,0	2,56	0,39	0,42	0,00	+ 0,007
8	0,80	4,6	98,0	2,56	1,79	5,24	— 0,03	+ 0,008
9	0,80	5,2	98,0	2,56	2,11	6,67	— 0,08	+ 0,11
10	1,0	1,2	148,0	1,70	0,46	0,15	0,00	+ 0,017
11	1,0	1,7	148,0	1,70	0,65	0,30	— 0,84	+ 0,034
12	1,0	2,3	148,0	1,70	0,70	0,56	— 0,15	+ 0,063
13	1,0	2,6	148,0	1,70	0,75	0,75	— 0,17	+ 0,080
14	1,0	2,8	148,0	1,70	0,84	0,82	— 0,20	+ 0,093
15	1,0	4,3	148,0	1,70	1,42	1,95	— 0,25	+ 0,221

Widać wyraźnie, że wartości prędkości \bar{u}_0 według Longuet-Higginsa są przy swobodnej powierzchni dla większych wartości KH wyższe od pomierzonych, równając się z prędkościami pomierzonymi przy $KH = 1,7$. Prędkości denne stwierdzone w doświadczeniach posiadały zwrot pod fale, jednak wartości ich były bardzo niewielkie. Przeciwny podanemu przez Longuet-Higginsa zwrot pomierzonych prędkości dennych jest prawdopodobnie wynikiem istnienia w doświadczeniach dosyć dużej szorstkości dna.

W przeprowadzonych doświadczeniach z falami wymuszonymi zachowano tę samą co przy falach swobodnych mechaniczną generację fali. Z racji działania wiatru na profil fali wysokość fal wzrosła, okres zaś i długość pozostały bez zmian. W tabeli 2 podana jest charakterystyka fal wymuszonych (zachowano tę samą kolejność fal jak w tabeli 1).

W trakcie doświadczeń mierzono prędkości unoszenia przy swobodnej powierzchni i przy dnie. Prędkości pomierzone przy swobodnej powierzchni były sumą prędkości transportu masowego fal swobodnych oraz prędkości prądu dryfowego. W celu obliczenia wartości prędkości dryfu odejmowano od pomierzonej wartości prędkości obliczoną prędkość transportu masowego. Tę ostatnią wyliczano interpolując pomiędzy wartościami pomierzonymi w doświadczeniach z falami swobodnymi, korzystając ze związku: $\bar{u} = b \left(\frac{h^2}{LT} \right)$. Interpolacja była wykonana oddzielnie dla każdego okresu fali.

Zgodnie z danymi tabeli 2 widoczne jest, że wartości prędkości prądu dryfowego były na ogół większe w przypadku fal o mniejszych stro-

Tabela (Table) 2

Charakterystyka fal wymuszonych ($H = \text{const} = 40 \text{ cm}$; $W = \text{const} = 5,5 \text{ m/sek}$)
 Characteristics of forced waves ($H = \text{const} = 40 \text{ cm}$; $W = \text{const} = 5,5 \text{ m/sek}$)

L.p.	(sek) T	(cm) L	$\delta = \frac{h}{L}$	(cm) h	\bar{u}_0 (cm/sek)			\bar{u}_H (cm/sek)		
					\bar{u}_{op}	\bar{u}_{ot}	\bar{u}_{od}	\bar{u}_{Hp}	\bar{u}_{Ht}	$\bar{u}_{Hp} - \bar{u}_{Ht}$
1	0,65	70	0,050	3,5	4,50	2,70	1,80	-0,97	-0,08	-0,89
2	0,65	70	0,071	5,0	5,78	4,35	1,43	-2,01	-0,17	-1,84
3	0,65	70	0,080	5,6	6,82	5,00	1,82	-1,82	-0,20	-1,65
4	0,65	70	0,093	6,5	7,82	6,00	1,82	-2,01	-0,32	-1,69
5	0,65	70	0,096	6,7	9,82	6,15	3,67	-2,38	-0,34	-2,04
6	0,65	70	0,110	7,7	11,50	8,00	3,50	-2,74	-0,45	-2,29
7	0,80	98	0,019	1,9	6,42	0,82	5,60	-0,85	-0,01	-0,84
8	0,30	98	0,058	5,7	8,40	2,55	5,85	-2,38	-0,09	-2,29
9	0,80	98	0,066	6,5	9,10	3,30	5,80	-2,21	-0,11	-2,10
10	1,00	148	0,017	2,5	6,66	0,74	5,92	-0,15	-0,17	-0,06
11	1,00	148	0,021	3,1	6,80	1,00	5,80	-0,44	-0,22	-0,22
12	1,00	148	0,022	3,2	6,83	1,05	5,78	-0,69	-0,22	-0,47
13	1,00	148	0,024	3,5	7,82	1,15	6,67	-1,20	-0,23	-0,97
14	1,00	148	0,027	4,0	7,90	1,35	6,55	-1,85	-0,25	-1,60
15	1,00	148	0,037	5,5	8,43	2,55	5,88	-1,94	-0,28	-1,66

\bar{u}_{op} — prędkość pomierzona przy swobodnej powierzchni
 \bar{u}_{ot} — prędkość wyliczona transportu masowego przy swobodnej powierzchni
 $\bar{u}_{od} = \bar{u}_{op} - \bar{u}_{ot}$ — prędkość prądu dryfowego
 \bar{u}_{Hp} — prędkość pomierzona przy dnie
 \bar{u}_{Ht} — prędkość wyliczona przy dnie fali swobodnej
 \bar{u}_{op} — measured surface velocity
 \bar{u}_{ot} — calculated surface velocity of mass transport
 \bar{u}_{od} — drift velocity
 \bar{u}_{Hp} — bottom velocity
 \bar{u}_{Ht} — bottom velocity of swell

mościach $\left(\delta = \frac{h}{L}\right)$. Dla okresu fal $T = 1,0$ sek, a nawet 0,8 sek były one prawie jednakowe, wahając się w granicach 5,60—6,67 cm/sek. Większe zróżnicowanie jest dla $T = 0,65$ sek. Z uwagi na zbyt szczupły jeszcze materiał doświadczalny trudne jest określenie wartościowe wielkości prądu dryfowego.

Przemieszczenie wody przy dnie było stale skierowane pod falę. Większe wartości prędkości odpowiadają na ogół falom krótszym i wyższym.

IV. WNIOSKI KOŃCOWE

Przeprowadzone badania laboratoryjne wprawdzie stanowią jeszcze dość szczupły materiał dowodowy, umożliwiając jednak sformułowanie wstępnych wniosków:

- 1) Fale wymuszone (wiatrem) posiadają odmienny układ kinematyczny aniżeli fale swobodne. Cząstki cieczy nie zataczają regularnych orbit, lecz poruszają się wzdłuż trochoid z pętlami o osi poziomej. Obserwowana jest znaczna turbulencja ruchu, szczególnie w przypadku fal wyższych.
- 2) Zarówno przy swobodnej powierzchni, jak i przy dnie (w przypadku fali wymuszonej) istnieje wyraźne wypadkowe przemieszczenie wody, przy czym przy swobodnej powierzchni jest ono stale skierowane zgodnie z falą, natomiast przy dnie — stale pod falę.
- 3) Stwierdzona w doświadczeniach prędkość prądu dryfowego waha się w granicach: $\bar{u}_d = (0,0033 \div 0,012)$ W.

Większa wartość współczynnika odpowiada falom oscylacyjnym o mniejszej stromości. Przyjmowana eksperymentalnie dla przestrzeni nieograniczonych wartość tego współczynnika (0,015) jest większa aniżeli stwierdzona w doświadczeniach autora pracy.

WYKAZ LITERATURY REFERENCES

- Kowalik Z. (1965), Przegląd metod obliczania stacjonarnych prądów wiatrowych. *Prz. geofiz.* R. 10, z. 3—4.
- Longuet-Higgins M.S. (1953), Mass transport in water waves. *Philosoph. Trans. Roy. Soc. London Ser. A* No 903.
- Onoszko J. (1965), Dynamika profilu brzegu piaszczystego pod wpływem działania fal o kierunku prostopadłym do linii brzegowej w świetle badań laboratoryjnych. *Rozpr. hydrotechn.*, z. 17.

SUMMARY

The phenomena of sediment transport in shoaling water is related to mass transport by wave motion.

The author performed laboratory investigations in a flume, on the kinematic characteristics of swell and waves forced by wind. The results obtained for swell confirmed qualitatively the theoretical distribution of mass transport, but the values of the measured velocities were different from the calculated ones.

In the case of forced waves a marked increase in the mean velocity vectors of mass transport near the surface was obtained with simultaneous marked displacement of water near the bottom, opposite to the wave direction. In the middle of the cross-section, considerable turbulence was observed, particularly for waves of high amplitude. In this area, there is no horizontal resultant of water displacement.

On the basis of the entrainment velocity, measured near the surface (\bar{u}_s), which is the sum of mass transport velocity of swell (\bar{u}_t) and drift velocity (\bar{u}_d), the drift velocity was calculated ($\bar{u}_d = \bar{u}_s - \bar{u}_t$). In the range of the experiments performed the proportionality coefficient between the drift velocity (\bar{u}_d) and wind velocity (W) varied from 0,0035 to 0,012.

OBJAŚNIENIE TABLIC
EXPLANATION OF PLATES

Tablica XVII — Plate XVII

Fig. 1. Fala swobodna $H = 40$ cm, $T = 0,80$ sek, $h = 4,6$ cm

Fig. 1. Swell $H = 40$ cm, $T = 0,80$ sek, $h = 4,6$ cm. (The arrow indicates direction of wave motion)

Fig. 2. Fala swobodna $H = 40$ cm, $T = 1,0$ sek, $h = 2,0$ cm

Fig. 2. Swell $H = 40$ cm, $T = 1,0$ sek, $h = 2,0$ cm

Tablica XVIII — Plate XVIII

Fig. 1. Fala wymuszona $H = 40$ cm, $T = 0,8$ sek, $h = 5,7$ cm, $W = 5,5$ m/sek

Fig. 1. Forced wave $H = 40$ cm, $T = 0,8$ sek, $h = 5,7$ cm, $W = 5,5$ m/sek

Fig. 2. Fala wymuszona $H = 40$ cm, $T = 1,0$ sek, $h = 5,5$ cm, $W = 5,5$ m/sek

Fig. 2. Forced wave $H = 40$ cm, $T = 1,0$ sek, $h = 5,5$ cm, $W = 5,5$ m/sek

