

Propagacja fal powierzchniowych w obecności prądu – analiza pomiarów wykonanych w kanale falowym IBW PAN

**Mgr Barbara Stachurska, mgr Dawid Majewski
Instytut Budownictwa Wodnego PAN w Gdańsku**

Współdziałanie fal i prądów wodnych jest ważnym procesem hydrodynamicznym zachodzącym w strefie brzegowej morza. Badania nad tym zjawiskiem są niezbędne z punktu widzenia inżynierii brzegowej do prawidłowego projektowania konstrukcji chroniących brzeg morski przed niszczącą siłą fal. W celu teoretycznego i praktycznego rozpoznania zjawisk, jakie zachodzą w tym rejonie, niezbędne jest przeprowadzenie odpowiednio przygotowanych eksperymentów w laboratorium. Badania takie dzięki swojej powtarzalności, zachowaniu parametrów falowania oraz prędkości prądu przyczyniają się do poszerzenia istniejącej wiedzy w tym temacie. W czasie trwania prac laboratoryjnych przeprowadzono badania rozkładu prędkości prądu, w profilu zarówno poziomym, jak i pionowym, w warunkach bezfalowych, jak i w obecności falowania powierzchniowego. W artykule przedstawiono wybrane wyniki eksperymentów wykonanych przy różnych zadanych prędkościach prądu i parametrach fali. Zaprezentowane wyniki stanowią dobrą podstawę do badań, między innymi nad wpływem prądu na zmianę charakterystyki falowania oraz nad wpływem prądu na załamanie fal

wodnych nad zanurzoną przeszkodą, na przykład nad falochronem podwodnym.

W artykule przedstawiono opis oraz wyniki eksperymentów wykonanych w laboratorium falowym Instytutu Budownictwa Wodnego PAN w Gdańsku, gdzie przeprowadzono szeroko zakrojone pomiary prędkości przepływu wody generowanego prądem oraz falowaniem. Były to pierwsze tego rodzaju eksperymenty w Polsce, których przeprowadzenie było możliwe dzięki niedawno zamontowanym turbinom prądotwórczym dającym możliwość badania wpływu prądu wody na fale grawitacyjne. Prędkości prądów rejestrowano za pomocą urządzenia ADV (*Acoustic Doppler Velocimeter*) firmy NORTEK, natomiast wychylenie powierzchni swobodnej mierzono za pomocą sond oporowych. W trakcie eksperymentu przeprowadzono pomiary prędkości prądu generowanego w obu kierunkach, zarówno bez udziału falowania, jak i z wygenerowaną serią fal. Pomiary wykonano w kanale w wytypowanych profilach pionowych i poziomych.

Mechanizm interakcji fal i prądów był obszernie badany w przeszłości. Pierwsze teoretyczne wzmianki pojawiły się w literaturze w latach pięćdziesiątych XX wieku. Hunt [4] w swojej pracy z 1955 roku opisał niektóre przypadki wpływu niejednorodnego prądu na dwuwymiarowe fale grawitacyjne. Do klasyki tematu należą prace Longuet-Higginsa i Stewarta [7], Peregrine'a [11] oraz Jonssona i innych [5]. Autorzy Ci opisywali szerokie spektrum problemów, od prac streszczających postrzegane pole falowo-prądowe, po precyzyjne opisy zmian amplitud fal. Longuet-Higgins i Stewart [6] w pracy z 1964 roku rozważali problem naprężenia radiacyjnego. Z kolei Grant i Madsen [3] zaproponowali analityczną teorię opisu wspólnego ruchu fali i prądów oraz oszacowali wartości składowych stycznych naprężeń powyżej szorstkiego dna, przedstawiając koncepcję wpływu szorstkości dna na profil prędkości prądu. Peregrine i Jonsson [12] w 1983 roku opublikowali raport prezentujący obszerny przegląd stanowiący przewodnik po tematyce związanej z wzajemnym oddziaływaniem pomiędzy falami i prądami. Jonsson i Christoffersen [5] dyskutowali załamanie fal regularnych w obecności prądu oraz określili głębokość, na której prąd powinien wystąpić, aby nastąpiło załamanie fali. W 1999 roku Wolf i Prandle [16] badali wpływ głębokości i zmian prądu na fale oraz wpływ fal na prądy pływowe. Opisali możliwe mechanizmy współdziałania pomiędzy falowaniem i pływami oraz przedstawił szereg obserwacji dotyczących mechanizmu współoddziaływania falowania i prądów, uwzględniając wpływ wiatru, tarcia przy dnie oraz zmian okresu fali. Oprócz licznych prac prezentujących numeryczne i analityczne modele zjawiska interakcji fali i prądów, tylko w kilku pracach prezentowano eksperymentalne badania tego zjawiska. Soares i de Pablo [13] w pracy z 2006 roku przedstawili współdziałanie pola falowego z jednorodnym polem prądowym, określili, w jaki sposób zmieniają się widma fal pod wpływem prądów. W 2009 roku Dong i Ma [2] omówili eksperymentalne badania transformacji fal długich na łagodnym skłonie. W 2010 roku Olabarrieta i inni [10] przeprowadzili eksperymenty laboratoryjne określające wpływ fal na profil prądu.

SPRZĘT POMIAROWY I ZAKRES BADAŃ LABORATORYJNYCH

Pomiary wykonano w kanale falowym, wykorzystując sprzęt pomiarowy znajdujący się na wyposażeniu laboratorium hydraulicznego IBW PAN. Kanał o długości 64 m, szerokości 0,60 m i wysokości 1,40 m został ostatnio istotnie zmodernizowany. W 2013 roku zainstalowano turbiny prądotwórcze typu FLYGT pp4640, które w zależności od głębokości wody są w stanie wygenerować przepływy wody o prędkościach od 0,1 m/s do 1 m/s w obu kierunkach. Generacja prądu jest sterowana elektronicznie i zapewnia stabilność średniej prędkości przepływu z odchyleniami nie większymi niż 2%. Ponadto, poprzednio używany hydrauliczny generator fal zastąpiono nowoczesnym generatorem elektrycznym typu tłokowego firmy DHI. Jest on sterowany komputerowo za pomocą oprogramowania DHI *Wave Synthesizer Software* i umożliwia generację fal zarówno regularnych, jak i nieregularnych. Układ generacji falowania jest dodatkowo wyposażony w system AWACS – *Active Wave Absorption Control System*, który umożliwia aktywną kontrolę wygaszania fali.

Płyta generatora fal do badań prowadzonych w kanale w obecności prądu jest zastąpiona płytą perforowaną o określonej porowatości w celu umożliwienia cyrkulacji wody.

Zmiany wzniesienia powierzchni swobodnej wody w czasie były mierzone za pomocą układu 2 sond oporowych z częstotliwością próbkowania 100 Hz, umieszczonych w kanale na 8 i 28 m jego długości (licząc od generatora fal). Pomiary prędkości wykonywano za pomocą prądomierza ADV (*Acoustic Doppler Velocimeter*) firmy NORTEK, który umożliwia pomiar trójwymiarowego pola prędkości wody w szerokim zakresie zastosowań, zarówno w laboratorium, jak i w warunkach naturalnych [14]. Wartość błędów pomiarowych wynosi $\pm 0,001$ m/s.

Przedmiotem eksperymentów były pomiary prędkości przepływu przy różnych głębokościach wody oraz zadanych prędkościach i kierunkach prądów. Celem badań było określenie rozkładu prędkości w przekroju poprzecznym oraz podłużnym kanału, zarówno w warunkach z falowaniem, jak i bez niego.

Zakres badań laboratoryjnych obejmował dwa etapy pomiarów prędkości przepływu wody w kanale. Pierwszym były pomiary w warunkach bezfalowych, przeprowadzone przy zadanych prędkościach prądu wymuszanych przez turbiny. W drugim etapie przeprowadzono serie badań prędkości przepływu w obecności prądu i falowania powierzchniowego przy różnych poziomach wody w kanale. Podczas eksperymentów rejestrowano zarówno prędkość cieczy w obecności zadanego prądu, jak i zmiany elewacji powierzchni swobodnej w wybranych punktach kanału falowego.

W trakcie pierwszego etapu rejestrowano prędkości przepływu przy trzech zadanych prędkościach prądu: 0,3 m/s, 0,5 m/s i 0,8 m/s. Prędkości te wyznaczono w sposób pośredni – na podstawie zadanych wydajności pomp (w m³ wody na jednostkę czasu). Czas trwania rejestracji pojedynczego pomiaru wynosił 1 minutę. Badania zrealizowano przy poziomie wody w kanale $h = 0,5$ m. Pomierzono prędkości prądu w profilach pionowych w odległości 23 m od wywoływacza fal. Użyto ADV zanurzonego na głębokościach: $z = -0,1$ m, $-0,2$ m, $-0,3$ m oraz $-0,4$ m. Badania przeprowadzono przy prądzie wymuszonym pompą P1 (przepływ w kierunku do generatora) lub P2 (przepływ w kierunku od generatora). Przyjęto konwencję, że prędkości prądu płynącego w kierunku do generatora mają znak ujemny, natomiast prądu płynącego w kierunku przeciwnym – znak dodatni. Schemat rozmieszczenia sond ADV i sond falowych w przekroju podłużnym kanału w poszczególnych seriach pomiarowych pokazano na rys. 1.

Następnie przeprowadzono pomiary prędkości prądu w celu analizy jego profilu w przekroju poprzecznym, prostopadłym do osi kanału. Wyniki rejestrowano za pomocą prędkościomierza ADV umieszczonego na głębokościach $z = -0,1$ m, $-0,2$ m, $-0,3$ m, $-0,4$ m w odległości $x = 23$ m od generatora, w przekroju poprzecznym w punktach 0.1W, 0.28W, 0.5W, 0.9W (gdzie W oznacza szerokość kanału równą 0,6 m, odpowiednio jest to: 6, 17, 30 i 54 cm szerokości kanału (rys. 2)). Badania przeprowadzono przy prądzie generowanym przez pompę P2 (w kierunku dodatnich wartości osi x).

Na rys. 3 zamieszczono przykładowy rozkład pomierzonych prędkości przepływu wody przy głębokości wody w kanale $h = 0,3$ m i zadanej na turbinie P2 prędkości $V_p = 0,16$ m/s.

prądu $V_p \sim 0,16$ m/s. Podczas wszystkich pomiarów wychylenie powierzchni swobodnej rejestrowano przy użyciu oporowych sond falowych.

WYNIKI

Zmiany w profilach prędkości prądu w przepływie bez fal

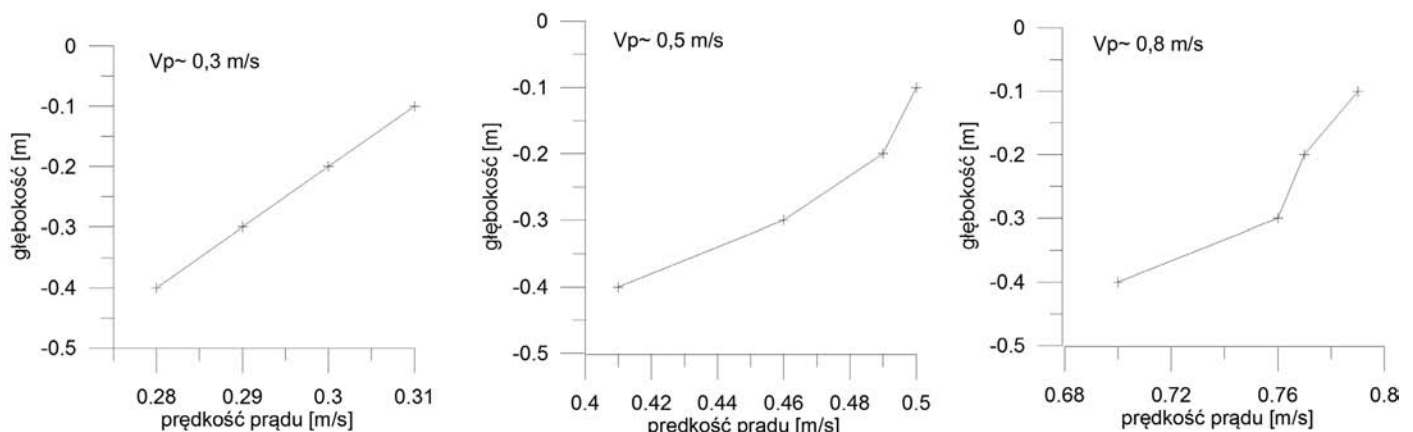
Celem przeprowadzonych badań w warunkach bezfalowych było wyznaczenie reprezentatywnego profilu pomiarowego, w którym wykonane badania miały dawać wyniki najbardziej zbliżone do rezultatów teoretycznych. Było to niezbędne do przeprowadzenia dalszych pomiarów z udziałem falowania. Ważnym elementem było również uzyskanie wyników rozłożenia prędkości przepływu w profilu pionowym oraz w przekroju poprzecznym i podłużnym do osi kanału.

W celu analizy rozkładu prędkości prądu w pionie wykorzystano wyniki pomiarów zarejestrowane na głębokościach $z = -0,1, -0,2, -0,3$ oraz $-0,4$ m. Na rys. 4 i 5 przedstawiono uśrednione w czasie profile pionowe prędkości prądu zmierzone w płaszczyźnie środkowej kanału, w odległości 23 m od generatora, przy prądach generowanych w obu kierunkach. Dodat-

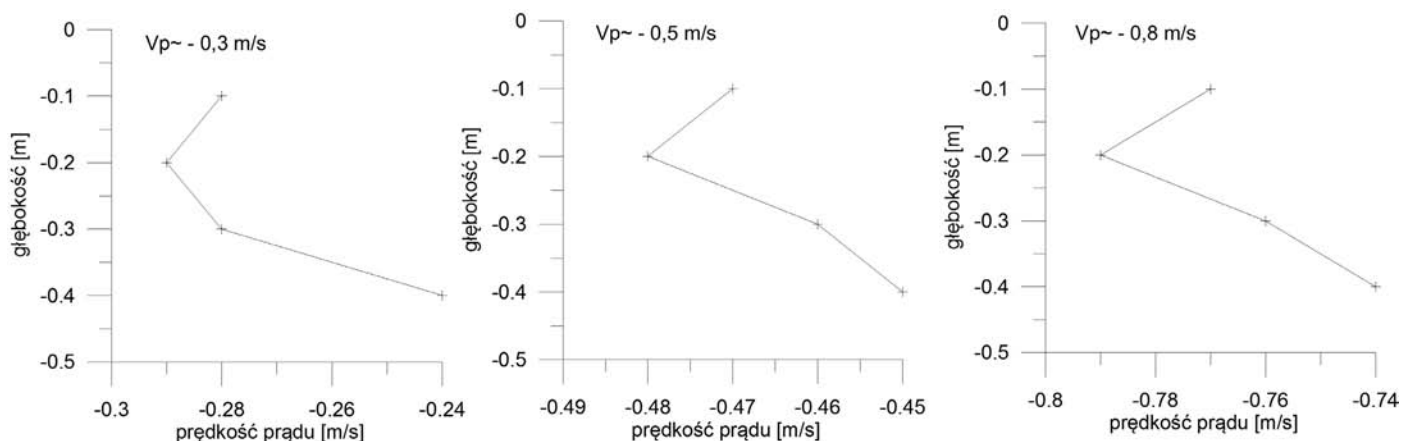
kowo, w tabl. 2 zamieszczono uśrednione prędkości przepływu zmierzone na różnych głębokościach. Z powodu wysokoczęstotliwościowych zmian w zapisie prędkości przepływu pokazanych na rys. 3 zastosowano uśrednienie prędkości w czasie, przyjmując 60-sekundowy czas trwania pomiaru. Jak widać na rys. 4, w przypadku prądu zgodnego z kierunkiem osi x następuje spadek prędkości prądu wraz z głębokością we wszystkich badanych przypadkach.

W przypadku prądu o kierunku przeciwnym do osi x (rys. 5) uzyskano nieco odmienne profile, w których maksymalne prędkości nie wystąpiły blisko powierzchni swobodnej na $z = -0,1$ m tylko na głębokości $z = -0,2$ m. Wpływ na takie wyniki może mieć różna odległość od pomp. Odległość od pompy pracującej, w przypadku przepływu w kierunku przeciwnym do osi x (P1), wynosiła 23 m. W przypadku przepływu zadanego zgodnie z osią x (P2) było to 41 m. Taka sytuacja może powodować różnice w profilu pionowym prędkości prądu.

Analiza wyników pomiarów wykonanych w przekroju poprzecznym do osi kanału w odległości 23 m od generatora (rys. 6) przy prądzie zgodnym z kierunkiem osi x wskazuje, że przepływ najbardziej zbliżony do zadanego uzyskano w środkowej części kanału, tj. w odległości $0,28 W$ i $0,5 W$ od ścian bocznych kanału (W – szerokość kanału). Prędkości przepływu pomierzone blisko szklanych ścian kanału są znacznie mniejsze



Rys. 4. Profil pionowy prędkości prądu. Prąd generowany pompą P2 usytuowaną w odległości 41 m od profilu, kierunek prądu zgodny z osią x . Odległość profilu od generatora $x = 23$ m



Rys. 5. Profil pionowy prędkości prądu. Prąd generowany pompą P1 usytuowaną w odległości 23 m od profilu, kierunek prądu przeciwny do osi x . Odległość profilu od generatora $x = 23$ m

Tabl. 2. Uśrednione prędkości przepływu zmierzone w punktach pomiarowych na różnych głębokościach

Głębokość pomiaru od powierzchni swobodnej [m]	Średnia prędkość przepływu [m/s] kierunek zgodny z osią x		
	$V_p = 0,3$ m/s	$V_p = 0,5$ m/s	$V_p = 0,8$ m/s
z			
-0,1	0,31	0,50	0,79
-0,2	0,30	0,49	0,77
-0,3	0,29	0,46	0,76
-0,4	0,28	0,41	0,70
	Średnia prędkość przepływu [m/s] kierunek przeciwny do osi x		
z	$V_p = -0,3$ m/s	$V_p = -0,5$ m/s	$V_p = -0,8$ m/s
-0,1	-0,28	-0,47	-0,77
-0,2	-0,29	-0,48	-0,79
-0,3	-0,28	-0,46	-0,76
-0,4	-0,24	-0,45	-0,74

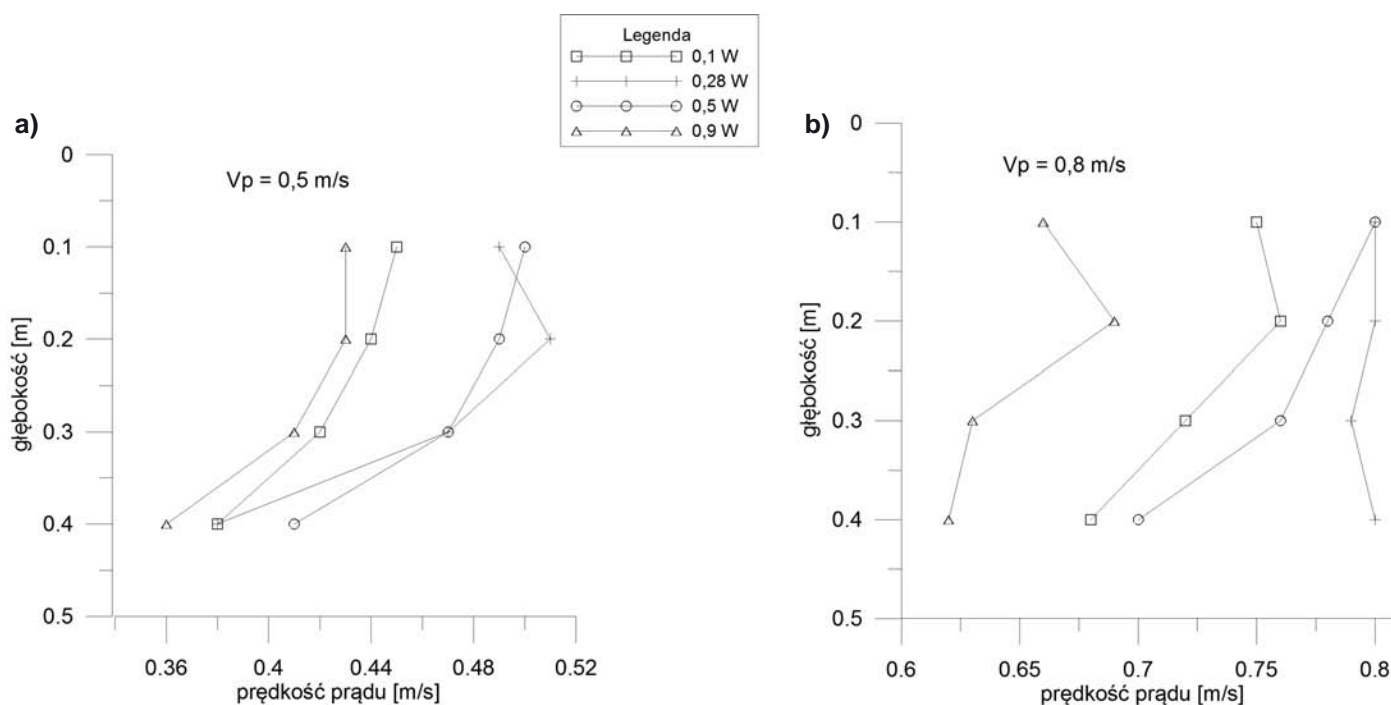
Tabl. 3. Procentowe zmniejszenie prędkości przepływu w sąsiedztwie ścian kanału w stosunku do osi kanału, przy prądzie o $V_p = 0,5$ m/s i $V_p = 0,8$ m/s. Prąd generowany pompą P2 zgodnie z kierunkiem osi x

Głębokość pomiaru od powierzchni swobodnej z [m]	Średnia prędkość przepływu 0,5 m/s		Średnia prędkość przepływu 0,8 m/s	
	% zmniejszenie prędkości 0,1 W	% zmniejszenie prędkości 0,9 W	% zmniejszenie prędkości 0,1 W	% zmniejszenie prędkości 0,9 W
-0,1	10	14	6	17,5
-0,2	10	12	3	12
-0,3	10	13	5	17
-0,4	7	12	3	11

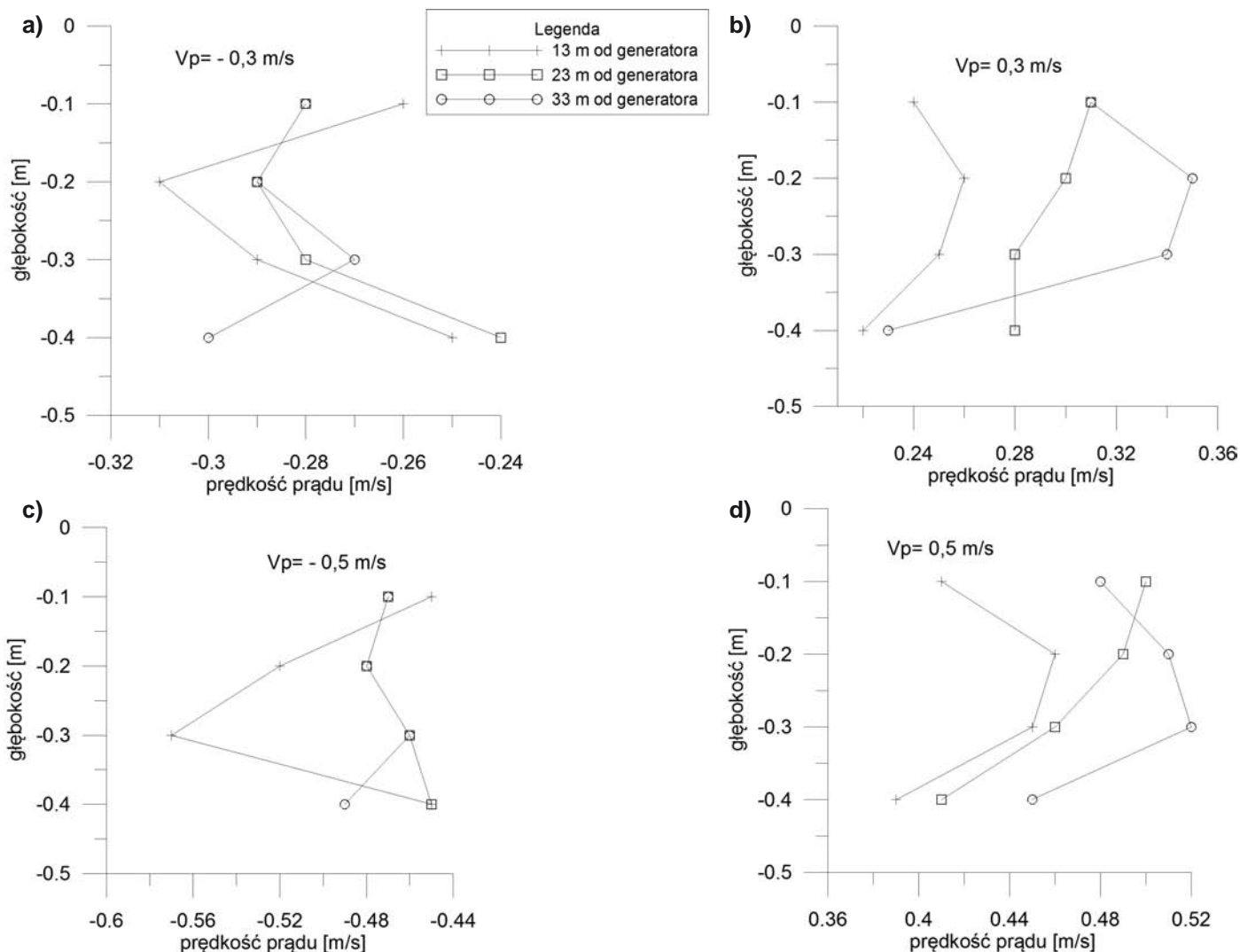
w przypadku prądu o $V_p = 0,5$ m/s nastąpił spadek jego prędkości o około 7 ÷ 10% w profilu 0,1 W oraz 12 ÷ 14% spadek w profilu 0,9 W. Przy prądzie o $V_p = 0,8$ m/s średnia prędkość przepływu w profilu 0,1 W była mniejsza o 3 ÷ 6 %, natomiast w profilu 0,9 W o 11 ÷ 17,5% w stosunku do osi kanału. Analizując pionowy profil prędkości stwierdzono, że najmniejsze procentowe zmniejszenie prędkości w stosunku do osi kanału przy rozpatrywanych prędkościach prądu odnotowano przy dnie na głębokości $z = -0,4$ m od powierzchni swobodnej, gdzie prędkości przepływu w związku z bliskością dna są zawsze mniejsze niż w środkowym obszarze kolumny wody.

Analizę profili prędkości wzdłuż długości kanału przeprowadzono w punktach pomiarowych usytuowanych w odległościach 13, 23 i 33 m od generatora. Na rys. 7 przedstawiono wykresy zmian wraz z głębokością w pionowym profilu prędkości prądu w poszczególnych punktach pomiarowych. Przedstawione wykresy ilustrują pomierzone prędkości przy prądzie 0,3 m/s i 0,5 m/s generowanym zarówno zgodnie, jak i przeciwnie do

niż te w środkowej jego części, a spowodowane jest to wpływem tarcia wody o ściany kanału, co jest odnotowane na każdej głębokości. W tabl. 3 przedstawiono obliczone procentowe zmniejszenie prędkości przepływu w sąsiedztwie ścian kanału (profile 0,1 W i 0,9 W) w stosunku do osi kanału (0,5 W). W zestawieniu rozpatrzono prąd generowany w kierunku zgodnym z osią x o prędkości $V_p = 0,5$ m/s oraz $V_p = 0,8$ m/s, pomierzone w odległości $x = 23$ m od generatora (rys. 2). Jak widać



Rys. 6. Profile prędkości przepływu w poprzek kanału. Prąd generowany pompą P2 w kierunku zgodnym z osią x, odległość od generatora $x = 23$ m



Rys. 7. Pomierzone profile prędkości przepływu wzdłuż osi kanału. Wartości ujemne V_p oznaczają prąd generowany w kierunku przeciwnym do osi x , dodatnie – w kierunku zgodnym z osią x

osi x . Jak widać najbardziej gładkim profilem zarówno przy prędkości $V_p = 0,5$ m/s, jak i $0,3$ m/s (niezależnie od kierunku przepływu), jest ten zmierzony na 23 m od generatora. W przypadku prądu generowanego w kierunku przeciwnym do osi x , przy obu zadanych prędkościach przepływu, wartości pomiarów na 23 i 33 m od generatora są zbliżone do prędkości prądu wymuszającego. Największe odchylenia od zadanej prędkości prądu wystąpiły w punkcie pomiarowym zlokalizowanym 13 m od generatora, przy obu kierunkach prądu.

Z tego też względu w celu przeprowadzenia pomiarów w obecności falowania, jako profil reprezentatywny wybrano ten umiejscowiony w odległości 23 m od generatora, w osi kanału 0,5 W. W profilu tym pomierzone prędkości przepływu wody są najbliższe generowanym prędkościom przez pompy P1 i P2.

Zmiany w profilach prędkości prądu oraz w elewacji powierzchni swobodnej w przepływie w obecności fal wodnych

Przeprowadzono serie eksperymentów w warunkach współdziałania fal powierzchniowych i prądów. W przypadku,

gdy falowanie jest generowane w obecności prądu, pewne charakterystyki fali, takie jak: okres, wysokość, prędkość fazowa ulegają pewnym modyfikacjom [13]. Zgodnie z teorią propagacji fali w obecności prądu zmieniają się parametry związku dyspersyjnego. Obecność prądu zmienia prędkość fali oraz wpływa na relacje pomiędzy obserwowaną długością fali a okresem. W przypadku prądu przeciwnego wysokość fali wzrasta (tabl. 3), a okres fali wydłuża się, odwrotnie dzieje się w przypadku prądu zgodnego z falowaniem, zgodnie z wzorem (1):

$$T = \frac{T'}{1 + V_p / \frac{\omega}{k}} \quad (1)$$

gdzie:

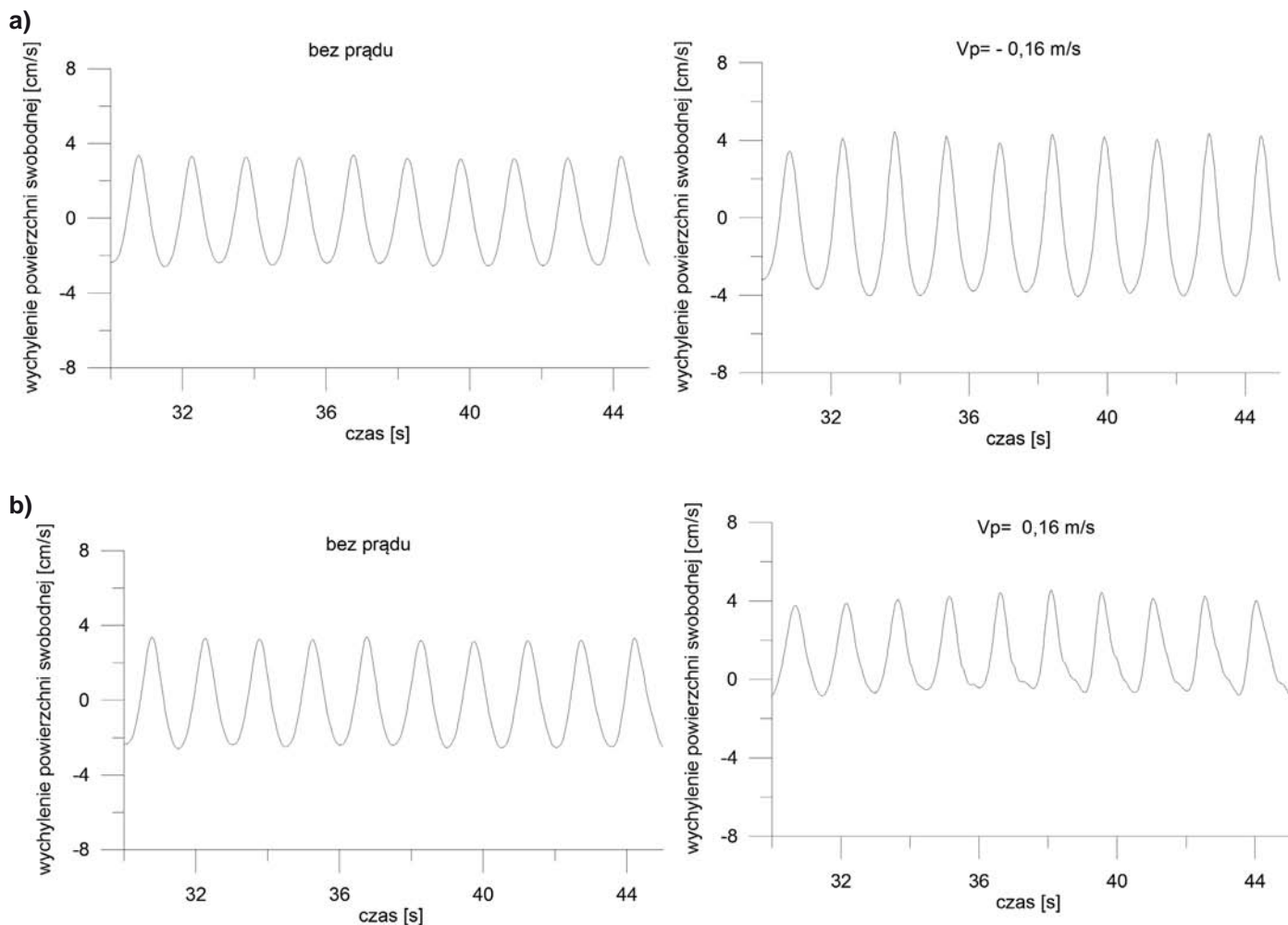
T – okres fali z prądem,

T' – okres fali bez prądu,

ω i k – częstość kołowa i liczba falowa fali bez prądu.

Interakcja pomiędzy falowaniem a prądami zmienia nie tylko charakterystyki fali, ale również całe pole przepływu.

Analiza zmian wychylenia powierzchni swobodnej na skutek interakcji fal z prądem o prędkości $V_p \sim 0,16$ m/s wykazała, że w przypadku fali o okresie $T = 1,5$ s (rys. 8) amplituda fali



Rys. 8. Zmiany elewacji powierzchni swobodnej w czasie w punkcie $x = 28$ m, fala o okresie $T = 1,5$ s
 a) pomiar bez prądu i z prądem w kierunku przeciwnym do osi x , b) pomiar bez prądu i z prądem zgodnym z kierunkiem osi x

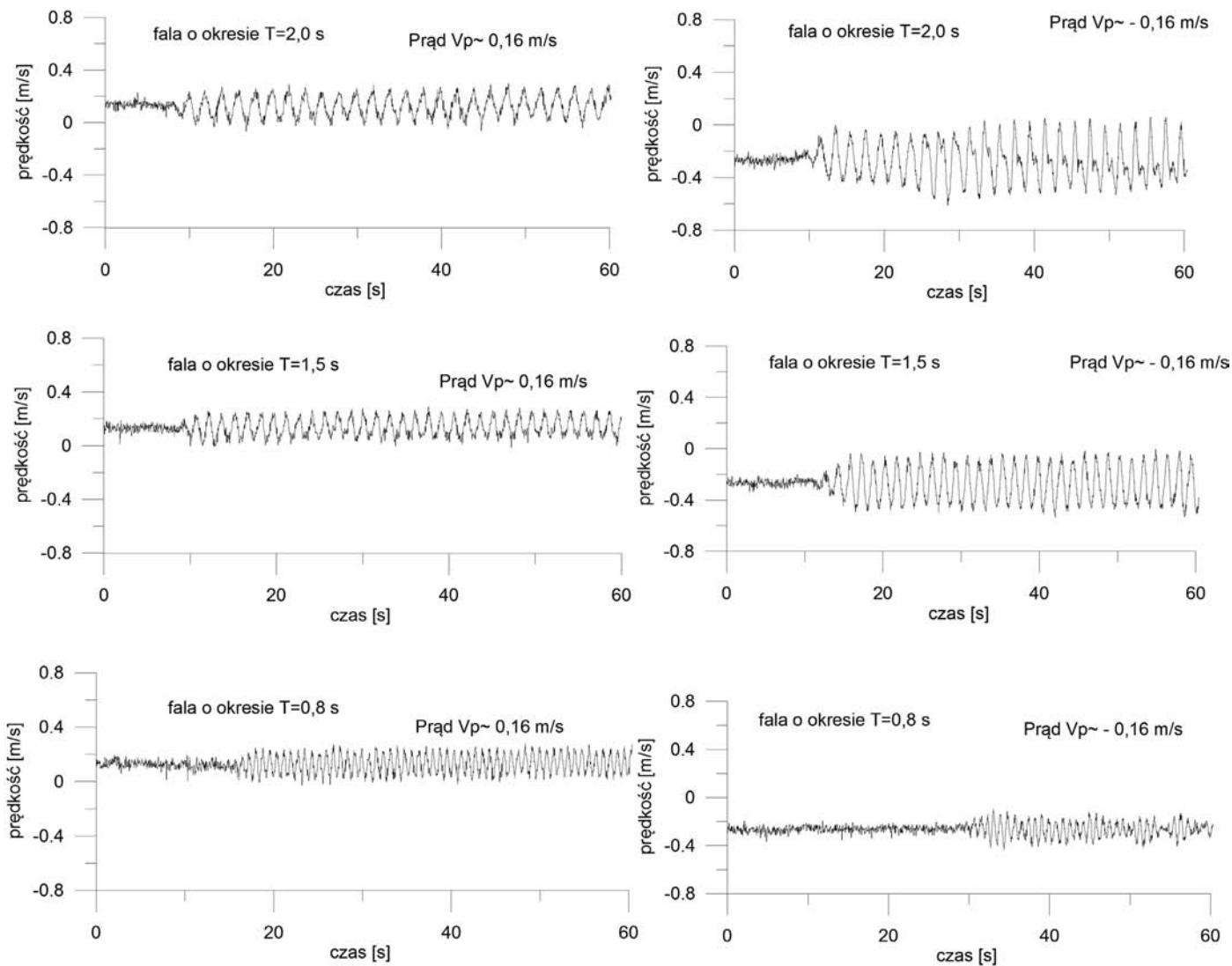
maleje w obecności prądu zgodnego z kierunkiem propagacji fali nawet o około 30% w porównaniu do sytuacji bez prądu wodnego, natomiast rośnie w przypadku wystąpienia prądu przeciwnego do kierunku falowania o około 20%. Podobny trend wykazują wyniki pomiarów fali o okresie $T = 2,0$ s, które wykazały zmniejszenie amplitudy fali o około 25% w przypadku obecności prądu zgodnego, natomiast w przypadku prądu przeciwnego do kierunku falowania wzrost amplitudy fali o około 10%. Podobne wyniki uzyskali Dong i Ma [2], którzy w artykule z 2009 roku analizowali wpływ prądu na transformację fal. Nieco inaczej sytuacja wygląda w przypadku fali o okresie $T = 0,8$ s, gdzie amplituda fali w obecności prądu zgodnego zmalała o około 20%, natomiast prąd przeciwny nie spowodował oczekiwanego wzrostu wychylenia powierzchni swobodnej. Może to być związane z dyssypacją energii fali o małym okresie wraz z odległością od generatora, na skutek tłumienia lepkościowego. W tabl. 4 przedstawiono procentowe zmiany wysokości fali w sytuacji bez prądu oraz w obecności prądu zgodnego, jak i przeciwnego do kierunku falowania. Jako 100% przyjęto wysokość fali o danym okresie w przepływie bez prądu.

Olaberrieta i inni [11], na podstawie danych eksperymentalnych, wyróżniają trzy podstawowe obszary w pionowym profilu prędkości przepływu z prądem. Pierwszy z nich występujący

Tabl. 4. Procentowe zmiany wysokości fali w przypadku falowania bez prądu oraz w obecności prądu zgodnego jak i przeciwnego do kierunku falowania, prędkość prądu $V_p \sim 0,16$ m/s, H – wysokość fali

T [s]	H [cm] bez prądu	%	H [cm] prąd zgodny $V_p = 0,16$ m/s	%	H [cm] prąd przeciwny $V_p = -0,16$ m/s	%
0,8	6,6	100	5,1	77	5,72	87
1,5	5,76	100	4,1	70	7,02	122
2	6,6	100	4,9	74	7,01	106

pomiędzy grzbietem i doliną fali jest powiązany z transportem masy poprzez fale. Drugi położony jest poniżej poziomu doliny fali, gdzie naprężenia Reynoldsa wywołane falowaniem generują zmiany w profilu pionowym prądu; i tak, w przypadku fal „zgodnych” z kierunkiem prądu następuje zmniejszenie amplitudy prędkości przepływu, natomiast w przypadku fal o kierunku przeciwnym do kierunku prądu, uzyskiwane jest jego wzmocnienie. Takie zmiany w profilu pionowym prędkości są bardziej wyraźne w przypadku fal wyższych. Segment trzeci profilu jest związany z obszarem bliskim dna, z warstwą przyścienną. W tym przypadku redukcja prędkości przepływu jest spowodowana szorstkością dna.

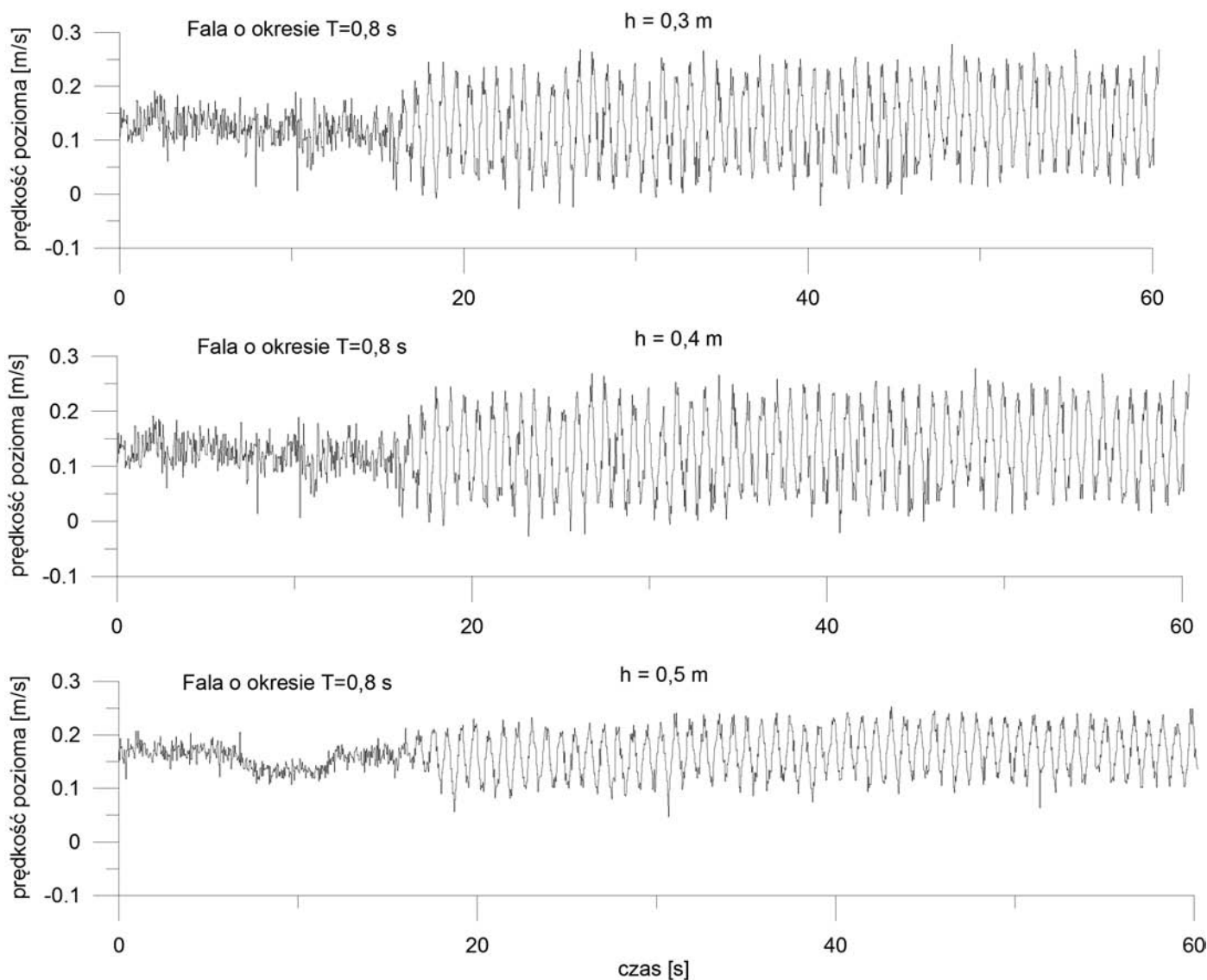


Rys. 9. Pomierzone prędkości przepływu wody mierzone poniżej poziomu doliny fali o różnym okresie, $V_p \sim 0,16$ m/s, zgodnie z kierunkiem osi x i przeciwnie do osi x , poziom wody w kanale $h = 0,4$ m

Eksperymenty przeprowadzone w kanale falowym miały na celu zweryfikowanie zmian, jakie zachodzą w obszarze drugim, położonym poniżej poziomu doliny fali ($z = -0,2$ m), gdzie występują największe amplitudy prędkości przepływu. Na rys. 9 pokazano zmiany prędkości poziomej w zależności od okresu fali w przepływie w obecności prądu zgodnego i przeciwnego do kierunku propagacji fali. Im większy okres fali tym większe amplitudy prędkości poziomych przepływu poniżej poziomu doliny fali. Gdy fale propagują przeciwnie do kierunku prądu, następuje wzrost amplitud prędkości, natomiast w przypadku propagacji fali w kierunku zgodnym z prądem następuje ich zmniejszenie. Oszacowano, że przy falach o okresie $T = 1,5$ s, propagujących w kierunku przeciwnym do kierunku generacji prądu, wzrost amplitud prędkości jest dwukrotny, natomiast przy falach o okresie $T = 2,0$ s niemalże trzykrotny. Zależność ta nie występuje w przypadku prądu zgodnego z kierunkiem propagacji falowania, gdzie zmiany w amplitudach prędkości są pomijalne. Musumeci i inni [9] stwierdzają, odwołując się do zasady zachowania masy, że wzrost prędkości w niższej partii kolumny wody musi być zbilansowany spadkiem prędkości w górnej jej części. W przypadku

fali „zgodnej” z kierunkiem prądu następuje zmniejszenie amplitudy prędkości przepływu dla wszystkich badanych fal, niezależnie od ich okresu, natomiast dla fal w obecności prądu przeciwnego do kierunku ich generacji, amplitudy prędkości są znacznie większe. Związane jest to z faktem, że zmniejszenie okresu fali powoduje zmniejszenie transportu masy, dzięki czemu prąd staje się bardziej znaczący, zmniejszając amplitudy prędkości w czasie. Należy zauważyć, że we wszystkich okresach fal i przy prądzie zarówno zgodnym, jak i przeciwnym do kierunku falowania, średnia prędkość prądu zmienia się nieznacznie, jedynie w granicy błędu. Zmieniają się natomiast amplitudy prędkości.

Ciekawym parametrem, który ulega zmianie w przypadku interakcji fal z prądami, jest czas propagacji fali. Jak wykazały analizy zadany prąd o prędkości $V_p \sim 0,16$ m/s miał największy wpływ na fale o okresie $T = 0,8$ s. W przypadku prądu zgodnego fala docierała do punktu pomiarowego po około 16 sekundach od momentu generacji, natomiast przy prądzie przeciwnym dopiero po 27 sekundach. W celu porównania, w przepływie bez prądu fala docierała do punktu pomiarowego po około 20 sekundach. Fala o okresie $T = 1,5$ s w warunkach bez prądu dotarła do



Rys. 10a. Pomierzone prędkości przepływu wody poniżej poziomu doliny fali o okresie $T = 0,8$ s, przy trzech różnych głębokościach wody h w kanale, generowany prąd zgodnie z kierunkiem osi x , $V_p \sim 0,16$ m/s

punktu pomiarowego po 11 sekundach, przy prądzie zgodnym po 9 sekundach, a przy prądzie przeciwnym po 13 s. W przypadku fali o okresie $T = 2,0$ s różnice są najmniej znaczące. Bez prądu fala w punkcie pomiarowym znalazła się po 10 sekundach, przy prądzie zgodnym po 8 sekundach, a przy przeciwnym po 11 s. Fale o małym okresie są bardziej wrażliwe na działanie prądu niż te o większym.

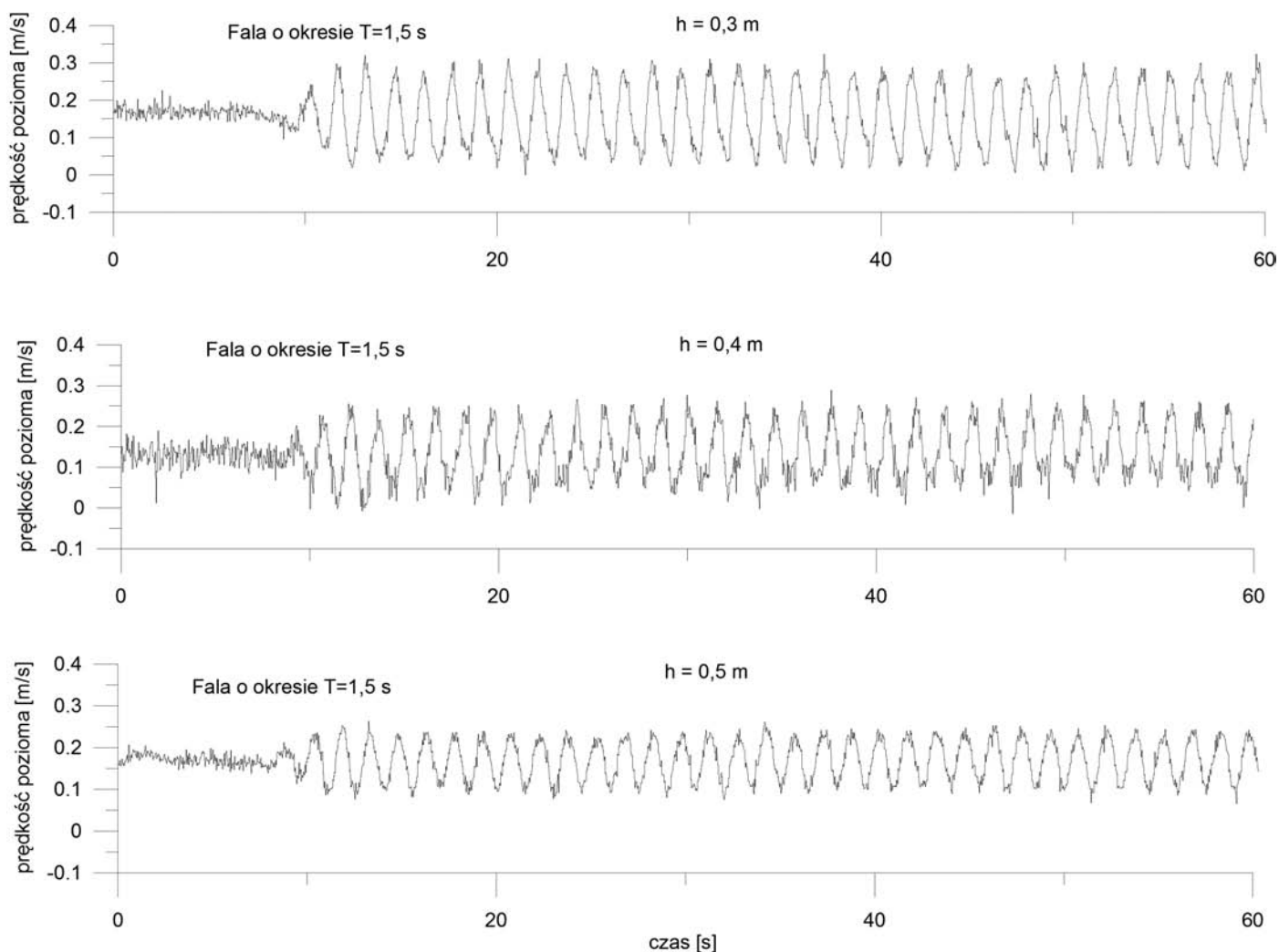
Na rys. 10a ÷ 10c przedstawiono wpływ zmiany poziomu wody (h) w kanale na prędkość przepływu wymuszonego prądem o prędkości $V_p \sim 0,16$ m/s. W przypadku fali o okresie 0,8 s (rys. 10a) amplitudy prędkości prądu poniżej poziomu doliny fali są podobne dla wszystkich analizowanych poziomów wody, nieznacznie rosną wraz ze zmniejszeniem głębokości wody w kanale. Nieco inaczej sprawa wygląda w przypadku fal o większych okresach. Przy fali o okresie 1,5 s (rys. 10b) i 2,0 s (rys. 10c) amplitudy prędkości przepływu są tym większe, im mniejsza jest głębokość wody w kanale. Należy jednak podkreślić, że średnia prędkość przepływu jest niezależna od okresu fali i przy danym poziomie wody w kanale pozostaje w przybliżeniu stała.

PODSUMOWANIE

W artykule zaprezentowano wyniki pomiarów prędkości przepływu wody w kanale, wymuszonego prądem w warunkach bez falowania, jak i w obecności fal. Tego rodzaju badania wykonano w Polsce po raz pierwszy.

Prace pomiarowe przeprowadzono dwuetapowo. Pierwszy etap obejmował wyznaczenie profili pionowych prędkości wody w różnych przekrojach poprzecznych kanału oraz wzdłuż osi kanału, w przepływie bez falowania. Było to istotne ze względu na konieczność wyznaczenia najbardziej reprezentatywnego profilu pomiarowego, w którym prowadzone były dalsze badania obejmujące obserwację interakcji falowania z generowanym prądem. Prędkość przepływu najbardziej zbliżoną do zadanej uzyskano w osi kanału w przekroju poprzecznym, w odległości 23 m od generatora.

Kolejna seria eksperymentów dotyczyła oceny współdziałania fal z prądem. Stwierdzono, że występuje wyraźna



Rys. 10b. Pomierzone prędkości przepływu wody poniżej poziomu doliny fali o okresie $T = 1,5$ s, przy trzech różnych głębokościach wody h w kanale, generowany prąd zgodnie z kierunkiem osi x , $V_p \sim 0,16$ m/s

zależność pomiędzy kierunkiem oraz prędkością prądu, charakteryzująca się zmianami w wychyleniu powierzchni swobodnej. Najciekawszym przypadkiem okazała się fala o okresie $T = 1,5$ s i prędkości prądu $V_p \sim 0,16$ m/s, gdzie przy prądzie przeciwnym do kierunku falowania amplituda wychylenia powierzchni swobodnej wzrosła o około 20%, natomiast w przypadku prądu zgodnego zmalała o około 30%.

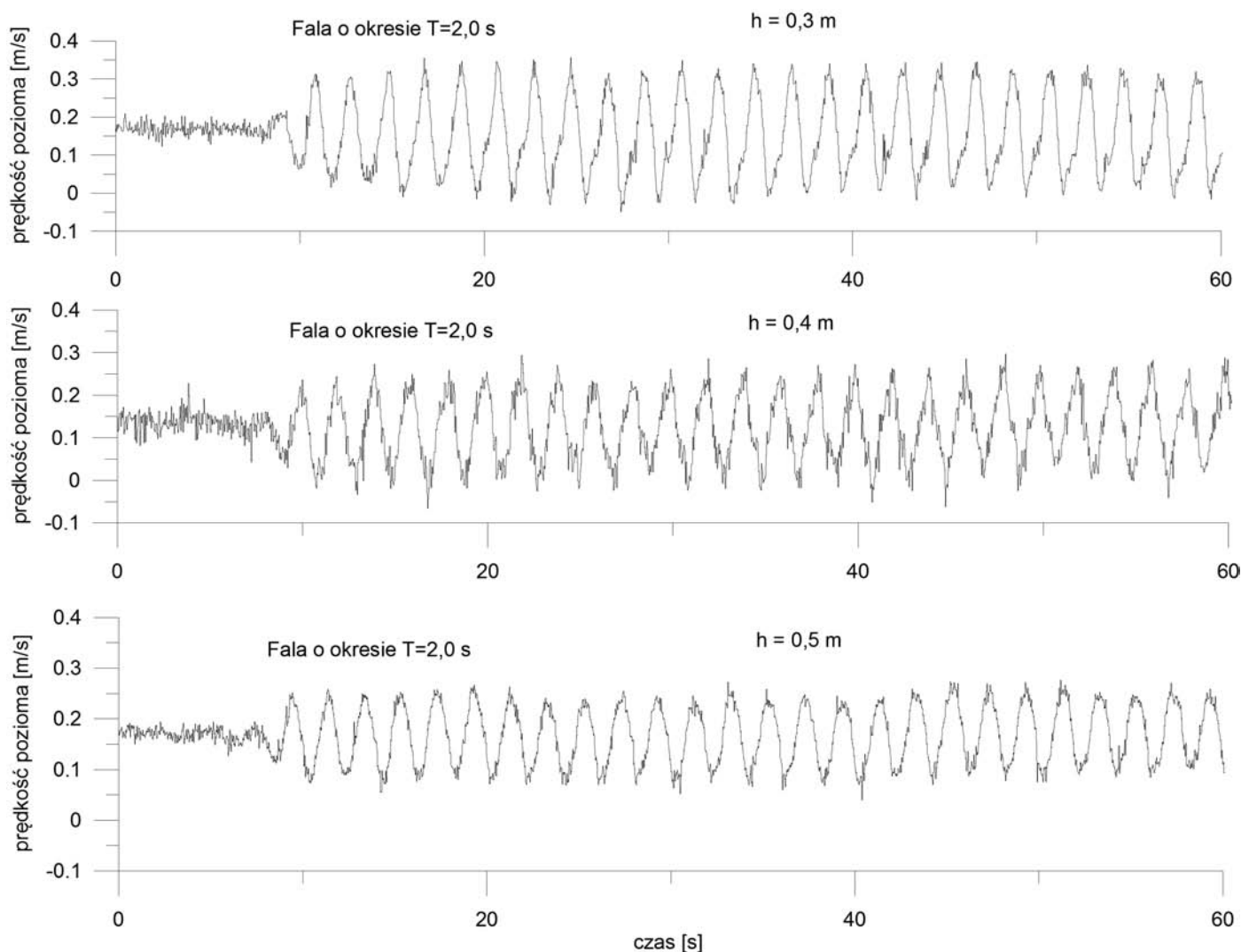
Ważnym efektem współdziałania fal i prądów były widoczne zmiany w amplitudach prędkości mierzonych poniżej poziomu doliny fali. Wartość tych amplitud była zależna od okresu fali. Takie obserwacje zgadzają się z badaniami Granta i Madsena [3] oraz Wolfa i Prandlego [16]. Wzrost amplitudy prędkości przepływu miał miejsce w przypadku fal generowanych w obecności prądu przeciwnego do kierunku ich propagacji, natomiast ich zmniejszenie następowało w przypadku propagacji fal w kierunku zgodnym z kierunkiem prądu. Zjawisko to jest związane z wpływem prądu na częstotliwość fali. Fale o jednakowym okresie generowane w przepływie z prądem zgodnym do kierunku ich propagacji charakteryzują się skróceniem okresu, natomiast w przepływie z prądem przeciwnym – jego wzrostem. Oszacowano, że w przypadku prędkości przepływu przy falach o okresie $T = 1,5$ s, amplituda prędkości wzrasta

dwukrotnie, natomiast przy falach o okresie $T = 2,0$ s niemalże trzykrotnie. Wzrost amplitudy prędkości nie występuje w przypadku generacji prądu zgodnego z kierunkiem falowania.

Czas propagacji fali w przypadku jej interakcji z prądem również ulegał zmianie. Prąd generowany zgodnie z kierunkiem falowania powodował przyspieszenie propagacji fali w czasie, natomiast prąd przeciwny jej spowolnienie. Fale o małym okresie były bardziej wrażliwe na działanie prądu niż te o większym.

Badano ponadto wpływ zmiany poziomu wody w kanale na zmiany prędkości przepływu wymuszonego prądem. Przy falach o małym okresie ($T = 0,8$ s) amplitudy prędkości były stałe. Natomiast przy falach o większych okresach amplitudy prędkości przepływu wody wzrastały w miarę zmniejszania się głębokości wody w kanale. Największe amplitudy wystąpiły w przypadku poziomu wody w kanale $h = 0,3$ m, najmniejsze natomiast przy $h = 0,5$ m.

Przedstawione w artykule wyniki eksperymentów są dobrym punktem wyjściowym do przyszłych badań nad szeroko pojętym współdziałaniem fal i prądów tak niezbędnych z punktu widzenia inżynierii brzegowej.



Rys. 10c. Pomierzone prędkości przepływu wody poniżej poziomu doliny fali o okresie $T = 2,0$ s, przy trzech różnych głębokościach wody h w kanale, generowany prąd zgodnie z kierunkiem osi x , $V_p \sim 0,16$ m/s

LITERATURA

1. Dean R, Dalrymple R.: Water wave mechanics for engineers and scientists, Advanced Series on Ocean Engineering – volume 2, 1991.
2. Dong G., Ma X.: Experimental study of the transformation of bound long waves over a mild slope with ambient currents, Coastal Engineering 56, 2009, 1035-1042.
3. Grant W.D., Madsen O.S.: Combined wave and current interaction with a rough bottom. J.Geophys.Res.84, 1979, 1797-1808.
4. Hunt J. N.: Gravity Waves in Flowing Water, Proceedings of the Royal Society of London, 231, 1955, 496-504.
5. Jonsson I., Christoffersen J.: Current depth refraction of regular waves, Coastal Engineering, 1984, 1103-1117.
6. Longuet-Higgins, M. S., Stewart R. W.: Radiation Stresses in water waves; a physical discussion with applications, Deep-Sea Research, 11, 1964, 529-562.
7. Longuet-Higgins, M. S., Stewart, R. W.: The Changes in Amplitude of Short Gravity Waves on Steady Non-Uniform Currents, J Fluid Mech 10, 1961, 529-539.
8. Monismith S. G. i in.: Laboratory observations of mean flows under surface gravity waves, J. Fluid Mech., Vol. 573, 2007, 131-147.
9. Musumeci R. i in.: Waves plus currents crossing at a right angle: Experimental investigation, Journal of Geophysical Research, Vol. 111, C07019, doi:10.1029/2005JC002933, 2006
10. Olabarrieta M., Medina R., Castanedo S.: Effects of wave-current interaction on the current profile, Coastal Engineering 57, 2010, 643-655.
11. Peregrine D. H.: Interaction of water waves and Currents. Adv. Appl. Mech. Vol. 16, 1976.
12. Peregrine D. H., Jonsson G.: Interaction of waves and currents. Coastal Engineering Research Center, Miscellaneous Report No. 83-6, 1983.
13. Soares C., de Pablo H.: Experimental study of the transformation of wave spectra by a uniform current, Ocean Engineering 33, 2006, 293-310.
14. Stachurska B., Majewski D.: Eksperymentalne pomiary prędkości prądu w kanale falowym IBW PAN. Raport Wewnętrzny IBW PAN, 2013.
15. Swan Ch.: An Experimental Study of Waves on a Strongly Sheared Current Profile. Coastal Engineering, 1990, 489-502.
16. Wolf J., Prandle D.: Some observations of wave-current interaction, Coastal Engineering 37, 1999, 471-485.
17. Zhanga J. S., Zhange Y., Jeng D.: S.: Numerical simulation of wave-current interaction using a RANS solver. Ocean Engineering, Vol. 75, 2014, 157-164.

PODZIĘKOWANIE: Dziękujemy Panu dr hab. inż. Ryszardowi Staroszczykowski prof. nadzw. IBW PAN za życzliwą pomoc, cenne rady i liczne wskazówki merytoryczne udzielone w trakcie realizacji niniejszego artykułu.