

empirycznych. Żadna z przytoczonych prac nie podaje jednak metod ogólnych, mających zastosowanie we wszystkich przypadkach występujących na drodze wodnej. Trudności w opracowaniu takiej metody związane są z dużą liczbą czynników, które należałoby uwzględnić oraz różnorodnością typów jednostek pływających. Do czynników związanych z drogą wodną należą: szerokość i głębokość koryta, spadek lustra wody i jej prędkość, a także szorstkość dna.

Czynnikami związanymi z jednostką pływającą są: kształt rufy, rodzaj i liczba pędników, liczba sterów, prędkość poruszania się jednostki, obroty śrub i głębokość zanurzenia.

Wśród cytowanych prac nie ma takiej, która by prezentowała metodę obliczeń pozwalającą na jednoczesne uwzględnienie wszystkich wymienionych czynników. Mając to na uwadze podjęto próbę opracowania metody opisu zjawiska z uwzględnieniem wszystkich wymienionych czynników, zakładając ich zmienność w granicach możliwych do wystąpienia na naszych śródlądowych drogach wodnych.

3. Obliczenie prędkości w strumieniu zaśrubowym

3.1. Równanie podstawowe

Z uwagi na wspomniane wyżej zróżnicowane warunki eksploatacyjne trudno przy obecnym stanie wiedzy, zaproponować ogólną metodę dającą możliwość określenia rozkładów prędkości w przekroju poprzecznym strumienia zaśrubowego. Można natomiast, i to z dobrym przybliżeniem, określić średnie prędkości w przekrojach poprzecznych strumienia wzdłuż drogi jego rozprzestrzeniania się.

W prezentowanej metodzie za równanie, które najlepiej pozwala uwzględnić siły tarcia, spadek zwierciadła wody, a także istnienie powierzchni ograniczających rozprzestrzenianie się strumienia zaśrubowego, uznano równanie pędu w postaci:

$$\frac{d}{dt}(\beta m v_{sr}) = P + T + G + \frac{d}{dt}(m_1 v_{ot}). \quad (1)$$

gdzie: β – współczynnik Boussinesqa, m – masa strumienia, m_1 – masa pochłaniana przez strumień, v_{sr} – prędkość średnia w rozpatrywanym przekroju strumienia, w kierunku osi x , P – suma rzutów sił ciśnienia hydrodynamicznego, T – rzut sił tarcia hydrodynamicznego, G – rzut sił ciężkości, v_{ot} – prędkość wody otaczającej strumień.

Wartości poszczególnych składników równania można wyrazić następująco:

$$P = -A dp, \quad T = -\kappa dx \tau, \quad G = (\pm) \gamma A dx \sin \alpha,$$

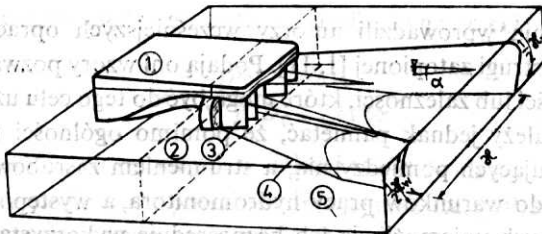
gdzie: A – powierzchnia przekroju strumienia, dp – przyrost ciśnienia, κ – część obwodu strumienia, na której występuje tarcie (rys. 1), dx – przyrost drogi w kierunku rozprzestrzeniania się strumienia, τ – siła tarcia na jednostkę powierzchni, γ – ciężar objętościowy wody, α – kąt zawarty między osią strumienia a płaszczyzną poziomą (rys. 1). Znak (+) dotyczy przypadku, w którym spadek zwierciadła wody jest zgodny z kierunkiem przepływu strumienia.

Po wprowadzeniu powyższych wielkości i podzieleniu równania przez $A\gamma$ otrzymuje się:

$$\frac{1}{A\gamma} \frac{d}{dt} (\beta m v_{sr}) + \frac{dp}{\gamma} + \frac{\tau}{\gamma R_h} dx \mp dx \sin \alpha - \frac{1}{A\gamma} \frac{d}{dt} (m_1 v_{o1}) = 0. \quad (2)$$

Jeżeli przyjąć za Konowałowem [11], że wartość dp/γ jest pomijalnie mała oraz że $\frac{\tau}{\gamma R_h} = J_e$, gdzie J_e jest spadkiem linii energii, a R_h promieniem hydraulicznym, to powyższe równanie można zapisać w postaci:

$$\frac{1}{A\gamma} \left[\frac{d}{dt} (\beta m v_{sr}) - \frac{d}{dt} (m_1 v_{o1}) \right] + J_e dx \mp dx \sin \alpha = 0. \quad (3)$$



Rys. 1. Fragment obszaru rozprzestrzeniania się strumienia zażrubowego

1 - rufa pchacza, 2 - pędnik, 3 - stery, 4 - granica strumienia, 5 - dno drogi wodnej

Z kolei przyrost natężenia przepływu wyrazić można wzorem:

$$dQ = dx v_b \kappa_w,$$

w którym v_b oznacza prędkość porywania, czyli prędkość dopływu wody do strumienia przez jego powierzchnię boczną $dA = dx \kappa_w$; κ_w oznacza tu część obwodu strumienia, na której następuje porywanie wody z otoczenia (rys. 1).

Ponieważ

$$dQ = d(A v_{sr}) = A dv_{sr} + v_{sr} dA \quad \text{więc} \quad A dv_{sr} + v_{sr} dA = dx v_b \kappa_w$$

stąd

$$dx = \frac{A dv_{sr} + v_{sr} dA}{\kappa_w v_b}. \quad (4)$$

Wstawiając tę zależność do równania pędu, a także przyjmując, że $\sin \alpha = \operatorname{tg} \alpha = J_d$ oraz wprowadzając zależności:

$$m = \rho A v_{sr} dt \quad dm = \rho (dA v_{sr} + A dv_{sr}) dt$$

otrzymuje się po odpowiednich przekształceniach równanie:

$$\frac{1}{A\kappa} [\rho (\beta v_{sr}^2 dA + 2\beta A v_{sr} dv + A v_{sr}^2 d\beta) - \rho v_{o1} (dA v_{sr} + A dv_{sr})] + \frac{A dv_{sr} + v_{sr} dA}{\kappa_w v_b} (J_e - J_d) = 0. \quad (5)$$

Równanie to po kolejnych przekształceniach można przedstawić w postaci:

$$dA = \frac{\left[v_{ot} - 2\beta v_{sr} - \frac{gA}{\kappa_w v_b} (J_e - J_d) \right] dv_{sr} + v_{sr}^2 d\beta}{\frac{v}{A} (\beta v_{sr} - v_{ot}) + \frac{g v_{sr}}{\kappa_w v_b} (J_e - J_d)} \quad (6)$$

Równanie (6) może służyć do określenia prędkości i innych parametrów strumienia w warunkach ograniczających jego rozplwanie się. Przedtem jednak konieczne jest określenie prędkości v_b , współczynnika β oraz obwodu strumienia κ_w .

3.2. Określenie prędkości v_b

Prędkość porywania wprowadzili autorzy wcześniejszych opracowań zajmujący się badaniem swobodnej strugi zatopionej [1, 11]. Podają oni wzory pozwalające na bezpośrednie określenie prędkości lub zależności, które mogą być do tego celu użyte po odpowiednich przekształceniach. Należy jednak pamiętać, że pomimo ogólności teorii strugi zatopionej i analogii występujących pomiędzy nią, a strumieniem zaśrubowym, wymienione zależności odnoszą się do warunków pracy hydromonitora, a występowanie w nich współczynników empirycznych uniemożliwia ich bezpośrednie wykorzystanie w naszym przypadku. Dlatego korzystniej będzie oprzeć się na badaniach, które bezpośrednio dotyczą strumienia zaśrubowego.

Prędkość porywania najłatwiej jest określić na podstawie analizy warunków, w których jest ona jedynym czynnikiem wpływającym na prędkość w strumieniu zaśrubowym. Warunki takie opisane zostały w pracach [4, 5, 8], z których wynika iż powierzchnię graniczną strumienia tworzy zbiór prostych wychodzących z pędnika pod określonym, stałym na długości kątem. Stwierdzenie to jest bardzo pomocne przy wyznaczeniu formuły określającej wartość prędkości porywania.

Posługując się równaniem (4) prędkość porywania wyrazić można zależnością:

$$v_b = \frac{A}{\kappa_w} \frac{dv_{sr}}{dx} + \frac{v_{sr}}{\kappa_w} \frac{dA}{dx} \quad (7)$$

W warunkach, w których strumień rozplwa się w granicach określonych powierzchnią stożka ściętego, tzn. podobnie jak struga swobodna, przekrojem strumienia jest koło, a więc obwód i powierzchnia jest funkcją jego średnicy. Po uwzględnieniu powyższego faktu równanie (7) przybierze postać:

$$v_b = \frac{D}{4} \frac{dv_{sr}}{dx} + \frac{1}{2} v_{sr} \frac{dD}{dx} \quad (8)$$

Średnicę strumienia można w tym przypadku wyrazić wzorem:

$$D = D_0 + 2x \operatorname{tg} \alpha \quad (9)$$

$$\frac{dD}{dx} = 2 \operatorname{tg} \alpha \quad (10)$$

D_0 – oznacza średnicę początkową, tj. dla $x=0$, x – odległość od pędnika, α – kąt rozprzestrzeniania się strumienia.

Pęd elementarnej objętości masy strumienia wyrazić można jako:

$$P = \beta m v_{sr} = \beta \rho A v_{sr}^2 dt. \quad (11)$$

W cytowanych pracach strumień rozprzestrzeniał się w wodzie stojącej. W tych warunkach można do przekroju początkowego i dowolnie oddalonego od pędnika, zastosować zasadę zachowania pędu:

$$\beta_0 A_0 v_0^2 = \beta A v_{sr}^2, \quad (12)$$

w której wielkości oznaczone indeksem „0” dotyczą przekroju początkowego (pędnik). Wyrażając powierzchnię za pomocą średnicy i podnosząc obie strony do potęgi $\frac{1}{2}$ mamy:

$$\sqrt{\beta_0} D_0 v_0 = \sqrt{\beta} D v_{sr}. \quad (13)$$

Po przekształceniu i uwzględnieniu zależności (9) równanie (11) przybierze postać:

$$v_{sr} = \sqrt{\frac{\beta_0}{\beta} \frac{D_0 v_0}{D_0 + 2x \operatorname{tg} \alpha}}. \quad (14)$$

Na podstawie doświadczeń opisanych w dalszej części pracy stwierdzono iż zmienność $\sqrt{\beta_0/\beta}$ jest tak mała, że możliwe jest potraktowanie jej jako stałej. Przyjęcie takiego uproszczenia umożliwia zróżniczkowanie równania (14) i otrzymanie wyrażenia:

$$\frac{dv_{sr}}{dx} = - \frac{\sqrt{\frac{\beta_0}{\beta}} v_0 D_0 2 \operatorname{tg} \alpha}{(D_0 + 2x \operatorname{tg} \alpha)^2}. \quad (15)$$

Wstawiając równania (9), (10) i (15) do równania (8) i odpowiednio przekształcając otrzymuje się:

$$v_b = \frac{1}{2} \operatorname{tg} \alpha v_{sr} = a v_{sr},$$

gdzie $a = \frac{1}{2} \operatorname{tg} \alpha$.

Otrzymuje się więc proste wyrażenie uzależniające poszukiwaną wartość prędkości porywania v_b od prędkości strumienia określonej względem otaczającej wody.

Również i w warunkach, w których na prędkość strumienia wpływać będą dodatkowe czynniki, można przyjąć, że prędkość porywania, a zatem ilość dopływającej do strumienia wody, będzie funkcją prędkości średniej w strumieniu. Dla warunków tych przyjęto iż wspomniana funkcja ma tę samą postać przy czym ilość porywanej wody będzie w tym przypadku mniejsza gdyż na powierzchniach ograniczających rozplływanie się strumienia (zw. wody, dno) porywanie wody nie będzie występowało.

3.3. Współczynnik Boussinesqa β

Współczynnik β określony jest zależnością:

$$\beta = \frac{\int v^2 dA}{v_{sr}^2 A}. \quad (16)$$

Jego wartość zależy więc od rozkładu prędkości, który dla warunków zbliżonych do rozprzestrzeniania się strugi swobodnej określony został w pracy [4]. Dla innych warunków zwłaszcza przy występowaniu prędkości wody w korycie oraz istnienia ograniczeń rozplywania się strumienia podane w tej pracy zależności nie mogą być stosowane.

Z uwagi na to, że w literaturze brak zależności opisujących rozkłady prędkości wody w strumieniu rozplywającym się pomiędzy płaszczyzną zwierciadła wody i dnem szlaku żeglownego, umożliwiającym określenie β , powstała konieczność przeprowadzenia badań własnych uwzględniających te ograniczenia, a także fakt, że za pędnikiem znajdują się stery.

Ażeby można było stosować wyniki badań do przypadku ogólnego, uwzględniającego pełen zakres zmienności prędkości statków i wody na drodze wodnej, badania musiałyby obejmować dużą liczbę kombinacji obu tych prędkości. Można jednak liczbę badań ograniczyć przez sprowadzenie przypadku ogólnego do przypadku wody stojącej, przez odjęcie od prędkości wody w strumieniu, prędkości wody otaczającej i znalezienie funkcji pozwalającej na przeliczenie wartości β z jednego przypadku na drugi. Funkcję tę można uzyskać wstawiając do wzoru (16) prędkość wody w następującej postaci: $v = v_z + v_{ot}$, gdzie v_z oznacza wzrost prędkości wody wynikający z pracy pędnika, a v_{ot} — prędkość wody otaczającej. Obie składowe odnoszone są do jednostki pływającej. Wstawiając powyższe wyrażenie do równania (16) otrzymuje się:

$$\beta = \frac{\int (v_z + v_{ot})^2 dA}{v_{sr}^2 A} \quad (17)$$

Licznik tego wyrażenia można rozpisać do postaci:

$$\int v_z^2 dA + 2 \int v_z v_{ot} dA + \int v_{ot}^2 dA.$$

Pierwsza całka reprezentuje pęd wody będący wynikiem wzrostu prędkości wywołanego pracą pędnika. Jej wartość można określić w zależności:

$$\int v_z^2 dA = \beta_p v_{sr,z}^2 A = \beta_p (v_{sr} - v_{ot}^2) A, \quad (18)$$

gdzie: β_p — współczynnik Boussinesqa dla przypadku, gdy $v_{ot} = 0$, $v_{sr,z}$ — średnia prędkość strumienia względem wody otaczającej, v_{sr} — średnia prędkość strumienia względem jednostki pływającej.

Biorąc pod uwagę fakt, że wzrost przepływu Q_z wywołany pracą pędnika jest równy: $\Delta v_{sr} - \Delta v_{ot} = \int v_z \cdot dA$ otrzymuje się drugą całkę w postaci:

$$2v_{ot} \int v_z dA = 2A(v_{ot}v_{sr} - v_{ot}^2). \quad (19)$$

Trzecia całka, w związku z tym, że $v_{ot} \approx \text{const}$ jest równa:

$$\int v_{ot}^2 dA = v_{ot}^2 A. \quad (20)$$

Uwzględniając powyższe zależności w równaniu (17) otrzymuje się:

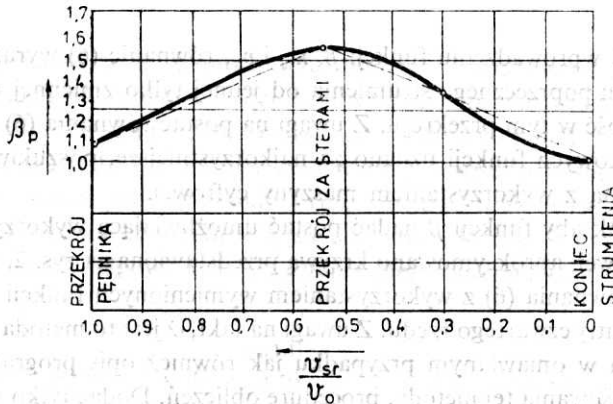
$$\beta = \frac{\beta_p (v_{sr} - v_{ot})^2 A + 2A(v_{ot}v_{sr} - v_{ot}^2) + v_{ot}^2 A}{v_{sr}^2 A}.$$

Po odpowiednich przekształceniach równanie sprowadza się do postaci

$$\beta = \beta_p + (\beta_p - 1) \left[\left(\frac{v_{ot}}{v_{sr}} \right)^2 - 2 \frac{v_{ot}}{v_{sr}} \right]. \quad (21)$$

Jak wynika z uzyskanej zależności, znając wartość współczynnika β_p dla przypadku szczególnego gdy $v_{ot}=0$, można wyznaczyć wartość β dla przypadku ogólnego (gdy $v_{ot} \neq 0$), możliwe jest także postępowanie odwrotne. Zależność ta eliminuje konieczność przeprowadzenia wielu badań dla różnych prędkości statku i wody na drodze wodnej.

Na podstawie badań rozkładów prędkości, opisanych szczegółowo w pracy [7], została określona funkcja $\beta=f(v_{sr}/v_0)$ dla warunków rozplywania się strumienia za pchaczem z rufą tunelową w przypadku istnienia ograniczeń rozplywania się strumienia przez zwierciadło wody i dno. Przebieg tej funkcji przedstawiony został na rys. 2.



Rys. 2. Wykres funkcji $\beta_p=f(v_{sr}/v_0)$

3.4. Określenie obwodu strumienia, przez który następuje porywanie wody

Jeżeli rozpatruje się przypadek odpowiadający strudze swobodnej to obwód, na którym woda otaczająca w wyniku znacznej turbulencji strumienia porywana jest do jego wnętrza, ma kształt okręgu. Jeżeli natomiast strumień wypływa spod rufy tunelowej wówczas z pewnym przybliżeniem można przyjąć, że jego przekrój poprzeczny w części górnej, jest prostokątem, a półkołem w części dolnej. Obwód, przez który woda z otoczenia może dopływać do strumienia będzie w tym przypadku, równy:

$$\kappa_w = D_0 + \pi R, \quad (22)$$

gdzie: D_0 – odległość osi pędnika od zwierciadła wody, R – promień dolnej części strumienia zaśrubowego.

Wyrażając R jako funkcję powierzchni przekroju poprzecznego można napisać:

$$R = \frac{-D_0 + \sqrt{D_0^2 + 2\pi A}}{\pi}. \quad (23)$$

Uwzględniając to wyrażenie otrzymuje się:

$$\kappa_w = \sqrt{D_0^2 + 2\pi A} \quad (24)$$

oraz

$$d\kappa_w = \frac{\pi dA}{\sqrt{D_0^2 + 2\pi A}}. \quad (25)$$

Po osiągnięciu przez strumień dna, jego rozptywanie ograniczone będzie płaszczyznami zwierciadła wody i dna, a zatem pomimo wzrostu powierzchni przekroju wynikającego z poszerzania się strumienia, obwód κ_w nie będzie wzrastał. Porywanie wody będzie, w tym przypadku, odbywało się wyłącznie na bocznych powierzchniach strumienia, których długość można przyjąć w przybliżeniu równą głębokości kanału.

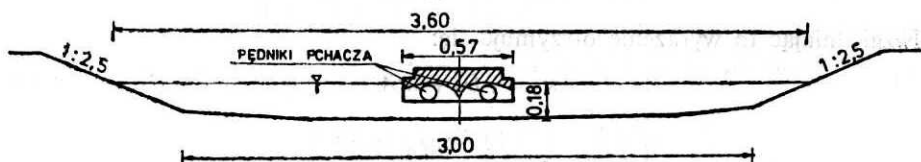
4. Metoda obliczeń

Po określeniu i wprowadzeniu funkcji β , κ_w i v_b , równanie (6) wyraża zależność powierzchni przekroju poprzecznego strumienia od jednej tylko zmiennej niezależnej, którą jest średnia prędkość w tym przekroju. Z uwagi na postać równania (6) i konieczność zastosowania dodatkowych funkcji uznano za najkorzystniejsze, poszukiwanie rozwiązania metodą numeryczną z wykorzystaniem maszyny cyfrowej.

Przedtem jednak aby funkcji β nadać postać umożliwiającą wykorzystanie jej w procedurze obliczeniowej, aproksymowano krzywą przedstawioną na rys. 2, dwoma prostymi. Do rozwiązania równania (6) z wykorzystaniem wymienionych funkcji zastosowano metodę Rungego – Kutty czwartego rzędu. Z uwagi na fakt, iż jest to metoda znana, pominięto opis jej wdrożenia w omawianym przypadku jak również opis programu realizującego, wynikającą z zastosowania tej metody, procedurę obliczeń. Dodać tylko należy, że obliczenia realizowano ze zmiennym krokiem Δv . Zmiany kroku program dokonywał w przypadku, gdy przy kroku aktualnym błąd metody przekraczał założoną dopuszczalną jego wartość lub gdy odległość pomiędzy kolejnym przekrojem strumienia była większa od przyjętej wartości maksymalnej. Odległości pomiędzy poszczególnymi przekrojami Δx wyznaczone były z równania (4).

5. Badania modelowe

Badania modelowe przeprowadzono głównie w celu sprawdzenia poprawności uzyskiwanych wyników obliczeń, ale także w celu przeprowadzenia doświadczeń, których wyniki posłużyły do wyznaczenia omówionej w poprzednim rozdziale funkcji $\beta = f(v_{sr})$. Tak w badaniach służących do określenia powyższej funkcji jak i w badaniach służących do weryfikacji wyników obliczeń należało wyznaczyć rozkłady prędkości w strumieniu zaśrubowym i na ich podstawie określić prędkości średnie w poszczególnych przekrojach poprzecznych strumienia zaśrubowego.



Rys. 3. Przekrój poprzeczny modelu drogi wodnej i zestawu pchanego

Tablica 1
Zestawienie prędkości wody w płaszczyźnie pędnika (w m/s)

Prędkość wody w kanale [m·s ⁻¹]	Prędkość zestawu [m·s ⁻¹]	Obroty śruby [s ⁻¹]	Wartości prędkości wody dla odległości punktu od osi pędnika $r=0,03$ m i kątach zawartych pomiędzy promieniem r a prostą pionową						Prędkość wody w osi pędnika [m·s ⁻¹]	Prędkość średnia w płaszczyźnie pędnika [m·s ⁻¹]
			$\alpha=0$	$\alpha=60^\circ$	$\alpha=120^\circ$	$\alpha=180^\circ$	$\alpha=240^\circ$	$\alpha=300^\circ$		
0,144	0,00	16,67	1,20	1,34	1,58	1,48	1,50	1,30	0,58	1,46
0,127	0,00	10,00	0,73	0,71	0,96	0,87	0,90	0,90	0,20	0,702
0,0	0,50	16,67	1,41	1,52	1,74	1,66	1,55	1,47	0,96	1,433
0,0	0,00	16,67	1,28	0,83	1,20	1,08	1,40	1,34	0,71	1,002

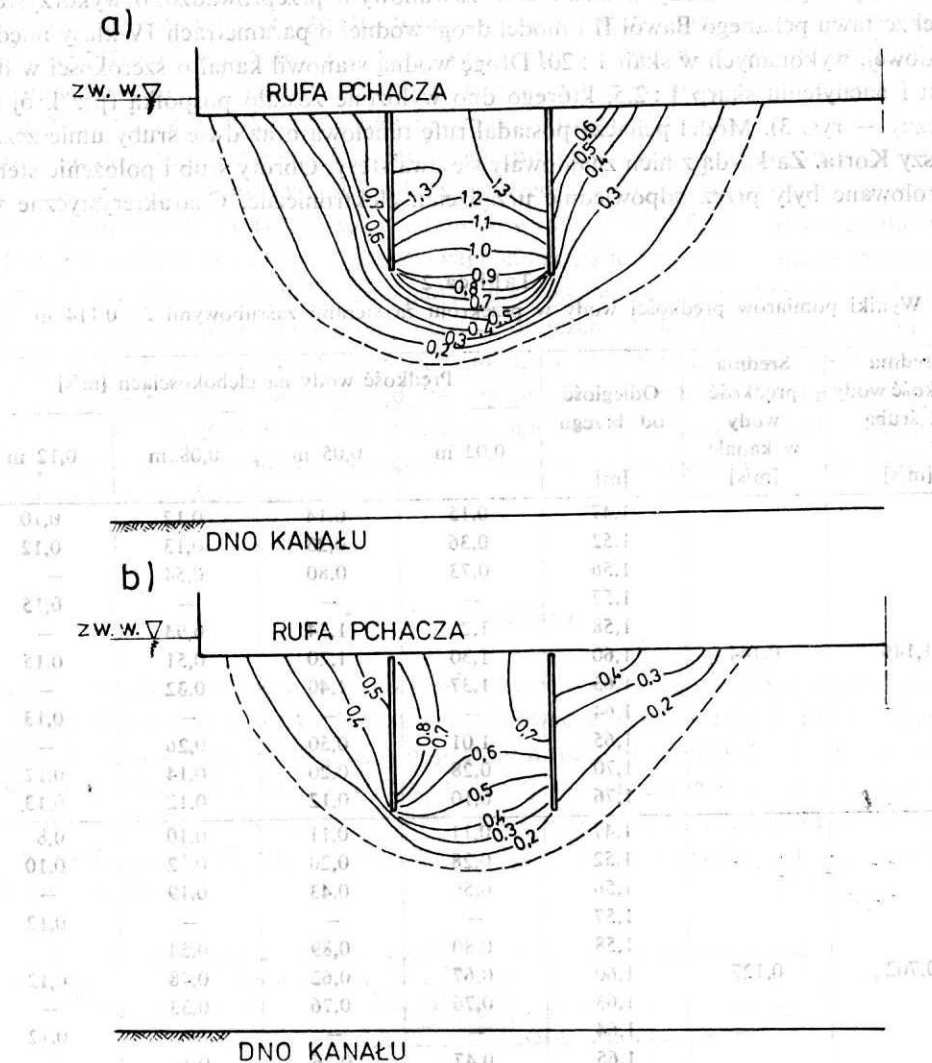
Pomiary prędkości wody w strumieniu zaśrubowym przeprowadzono wykorzystując model zestawu pchanego Bawół II i model drogi wodnej o parametrach IV klasy międzynarodowej, wykonanych w skali 1 : 20. Drogę wodną stanowił kanał o szerokości w dnie 3,0 m i nachyleniu skarp 1 : 2,5, którego dno wyłożone zostało pospółką (przekrój poprzeczny – rys. 3). Model pchacza posiadał rurę tunelową oraz dwie śruby umieszczone w dyszy Korta. Za każdą z nich znajdowały się dwa stery. Obroty śrub i położenie sterów kontrolowane były przez odpowiednie urządzenia elektroniczne. Charakterystyczne wy-

Tablica 2
Wyniki pomiarów prędkości wody w przekroju za sterami zaśrubowymi $L=0,114$ m

Średnia prędkość wody za śrubą [m/s]	Średnia prędkość wody w kanale [m/s]	Odległość od brzegu [m]	Prędkość wody na głębokościach [m/s]			
			0,02 m	0,05 m	0,08 m	0,12 m
1,146	0,144	1,47	0,15	0,14	0,12	0,10
		1,52	0,36	0,23	0,13	0,12
		1,56	0,73	0,80	0,54	–
		1,57	–	–	–	0,15
		1,58	1,2	1,34	0,94	–
		1,60	1,30	1,20	0,51	0,15
		1,63	1,37	1,40	0,32	–
		1,64	–	–	–	0,13
		1,65	1,01	0,50	0,26	–
		1,70	0,28	0,20	0,14	0,12
		1,76	0,10	0,12	0,12	0,13
0,702	0,127	1,47	0,11	0,11	0,10	0,8
		1,52	0,28	0,20	0,12	0,10
		1,56	0,56	0,43	0,19	–
		1,57	–	–	–	0,12
		1,58	0,80	0,89	0,54	–
		1,60	0,67	0,62	0,48	0,12
		1,63	0,76	0,76	0,33	–
		1,64	–	–	–	0,12
		1,65	0,47	0,26	0,16	–
		1,70	0,32	0,16	0,11	0,11
		1,76	0,10	0,06	0,02	0,07

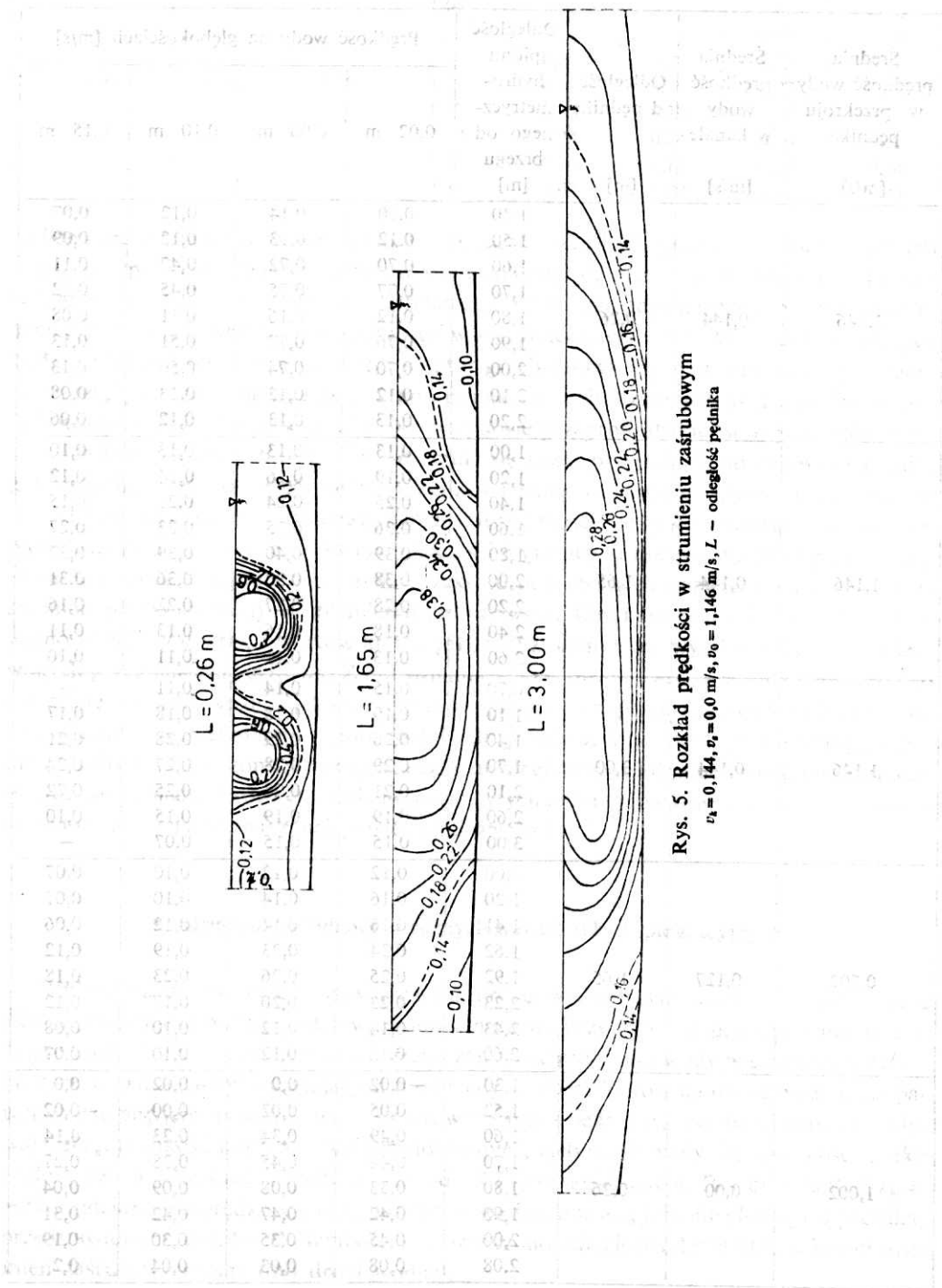
miary zestawu były następujące: szerokość 0,57 m, długość barki 4,10 m, długość pchacza 1,12 m, średnica pędników 0,0875 m. Obroty śrub można było zmienić w zakresie od 10 do $16,7 \text{ s}^{-1}$. Przepływ wody na drodze wodnej kontrolowany był prostokątnym przelewem pomiarowym, natomiast prędkości w strumieniu zaśrubowym mierzono mikromłynkiem o średnicy 9 mm. Wyniki pomiarów zestawiono w tablicach 1 - 3, a przykłady wyznaczonych rozkładów prędkości przedstawione są na rys. 4 i 5.

Znając rozkłady prędkości, można wyznaczyć średnią prędkość w przekroju strumienia zaśrubowego, pod warunkiem że znana jest granica między strumieniem a wodą otaczającą go. Zasadnicza trudność w jej wyznaczeniu polega na tym, iż rozprzestrzenianie się strumienia zaśrubowego ma charakter rozchodzenia się zaburzenia w określonym polu prędkości,



Rys. 4. Rozkład prędkości wody za sterami

a) $v_0 = 1,146 \text{ m/s}$, $v_2 = 0,144 \text{ m/s}$, b) $v_0 = 0,702 \text{ m/s}$, $v_2 = 0,127 \text{ m/s}$



Rys. 5. Rozkład prędkości w strumieniu zastrubowym
 $v_1 = 0.144$, $v_2 = 0.0 \text{ m/s}$, $v_0 = 1.146 \text{ m/s}$, L - odległość pędnika

Tablica 3

Zestawienie wyników pomiarów prędkości wody w strumieniu zaśrubowym w m/s

Średnia prędkość wody w przekroju pędnika [m/s]	Średnia prędkość wody w kanale [m/s]	Odległość od pędnika [m]	Odległość pionu hydro-metrycznego od brzegu [m]	Prędkość wody na głębokościach [m/s]			
				0,02 m	0,06 m	0,10 m	0,15 m
1,146	0,144	0,26	1,40	0,10	0,14	0,12	0,07
			1,50	0,12	0,13	0,12	0,09
			1,60	0,70	0,72	0,47	0,11
			1,70	0,77	0,75	0,45	0,12
			1,80	0,12	0,16	0,11	0,08
			1,90	0,76	0,77	0,51	0,13
			2,00	0,70	0,74	0,50	0,13
			2,10	0,12	0,13	0,13	0,08
			2,20	0,13	0,13	0,12	0,06
1,146	0,144	1,65	1,00	0,13	0,13	0,13	0,10
			1,20	0,19	0,16	0,14	0,12
			1,40	0,25	0,24	0,21	0,15
			1,60	0,36	0,35	0,33	0,27
			1,80	0,39	0,40	0,39	0,32
			2,00	0,38	0,38	0,36	0,31
			2,20	0,28	0,27	0,22	0,16
			2,40	0,18	0,16	0,13	0,11
			2,60	0,13	0,11	0,11	0,10
1,146	0,144	3,00	0,70	0,15	0,14	0,11	—
			1,10	0,19	0,18	0,18	0,17
			1,40	0,26	0,29	0,28	0,21
			1,70	0,29	0,28	0,27	0,24
			2,10	0,21	0,28	0,25	0,22
			2,60	0,19	0,19	0,15	0,10
			3,00	0,15	0,15	0,07	—
0,702	0,127	1,65	1,00	0,12	0,12	0,10	0,07
			1,20	0,16	0,14	0,10	0,07
			1,41	0,16	0,14	0,12	0,06
			1,62	0,24	0,23	0,19	0,12
			1,92	0,25	0,26	0,23	0,18
			2,23	0,23	0,20	0,17	0,12
			2,43	0,14	0,12	0,10	0,08
2,60	0,12	0,12	0,10	0,07			
1,002	0,00	0,26	1,30	-0,02	0,0	-0,02	0,0
			1,52	0,05	0,02	0,00	-0,02
			1,60	0,49	0,34	0,23	0,14
			1,70	0,44	0,45	0,38	0,27
			1,80	0,33	0,08	0,09	0,04
			1,90	0,42	0,47	0,42	0,31
			2,00	0,45	0,35	0,30	0,19
			2,08	0,08	0,03	0,04	0,2

cd. tab. 3

1,002	0,00	0,70	0,50	-0,12	-0,10	-0,08	-0,10
			1,05	0,02	0,02	0,00	0,00
			1,25	0,13	0,13	0,13	0,12
			1,50	0,20	0,22	0,23	0,21
			1,70	0,32	0,34	0,27	0,22
			1,90	0,38	0,36	0,28	0,23
			2,10	0,24	0,24	0,23	0,22
			2,30	0,10	0,12	0,14	0,14
			2,50	-0,02	0,00	0,02	0,03

podlegającego prawu rozkładu normalnego. Ścisłe określenie granicy strumienia nie jest w tym przypadku możliwe, gdyż teoretycznie znajduje się ona w nieskończoności. Istnieje natomiast możliwość przybliżonego ustalenia jej przebiegu, gdyż znaczna turbulencja strumienia dostatecznie wyraźnie wyróżnia go wśród otaczającej wody. W przeprowadzonych badaniach zastosowano do tego celu aerator grzebieniowy [6] oraz inne metody wizualizacji przepływu. Po opracowaniu wyników pomiarów stwierdzono jednak, że nie dawały one zadowalająco dokładnych wyników. Na podstawie przeprowadzonej serii pomiarów ustalono, że bardziej dokładne wyniki otrzymuje się przez przyjęcie, iż poszukiwaną granicą jest izotacha odpowiadająca średniej prędkości wody otaczającej strumień. Izotachę tę można było wyznaczyć dysponując pomiarami prędkości nie tylko w strumieniu zaśrubowym, lecz i w jego otoczeniu. Na rysunkach 4 i 5 granicę tę zaznaczono linią przerywaną. Znajomość rozkładu prędkości i pola przekroju poprzecznego pozwoliła na wyznaczenie średnich prędkości wody w strumieniu zaśrubowym. Uzyskane wartości liczbowe zestawiono w tablicy 4 wraz z wartościami prędkości uzyskanymi w wyniku obliczeń zrealizowanych przez maszynę cyfrową. Z porównania zestawionych wartości wynika, że zarówno obliczone prędkości średnie jak i powierzchnia przekroju poprzecznego wykazują zgodność z wartościami pomierzonymi w granicach błędu pomiaru. Maksymalny błąd względny pomiarów został wyznaczony metodą różniczki zupełnej, przy założeniu iż wielkości mierzone obarczone są błędami równymi dokładności użytych przyrządów oraz przy wykorzystaniu równania (6). Dla wyznaczonej powierzchni wynosił on 15%.

6. Strumień zaśrubowy w różnych warunkach eksploatacyjnych

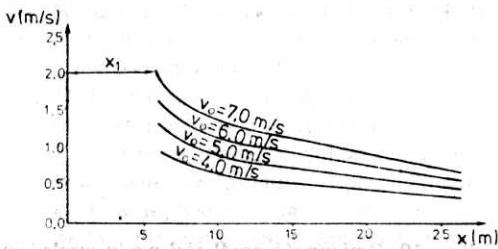
Wpływ warunków eksploatacyjnych na drogę wodną analizowany był dotychczas głównie za pomocą badań modelowych lub w naturze. Przy użyciu zaprezentowanej wcześniej metody obliczeniowej przeanalizowano zależność prędkości wody w strumieniu zaśrubowym od parametrów decydujących o oddziaływaniu pędników na drogę wodną. Za parametry te przyjęto: prędkość wody generowaną przez pędnik v_0 , prędkość jednostki pływającej v_s , prędkość wody na szlaku żeglownym v_k , głębokość wody H , szerokość szlaku żeglownego B oraz spadek zwierciadła wody J i szorstkość dna n . Przebieg funkcji $v_{kr} = f(x)$, gdzie v_{kr} jest prędkością wody liczoną względem dna a x , jest odległością od pędnika, przedstawiono na rys. 6 - 12. Symbolem x_1 oznaczono odległość od pędnika, w której strumień zaśrubowy osiąga dno drogi wodnej.

Tablica 4
Porównanie wyników obliczeń i pomiarów strumienia zaśrubowego

Średnia prędkość wody w kanale [m/s]	Średnia prędkość w przekroju pędnika [m/s]	Głębokość wody [m]	Odległość od pędnika [m]	Parametry porównywane								
				prędkość średnia w strumieniu obliczenia [m/s]	na modelu [%]	powierzchnia przekroju obliczenia [m ²]	na modelu [m ²]	[%]	szerość przekroju obliczenia [m]	na model [m]	[%]	
0,144	1,46	0,175	0,11	0,695	0,618	12,9	0,0152	0,0170	10,6	0,152	0,180	15,5
			0,26	0,571	0,488	17,0	0,0269	0,0293	8,2	0,212	0,250	15,0
			1,65	0,318	0,282	12,8	0,199	0,197	1,0	1,138	1,129	11,3
			3,00	0,235	0,209	12,4	0,323	0,335	3,6	1,845	1,914	3,6
0,127	0,702	0,165	0,11	0,467	0,413	13,1	0,0135	0,0156	14,0	0,140	0,170	17,6
			1,65	0,234	0,200	16,9	0,162	0,151	7,3	0,953	0,915	4,1
0,00	1,002	0,175	0,26	0,331	0,276	0,2	0,043	0,046	6,5	0,245	0,263	6,8
			0,70	0,221	0,185	19,5	0,176	0,242	27,3	1,004	1,383	27,4

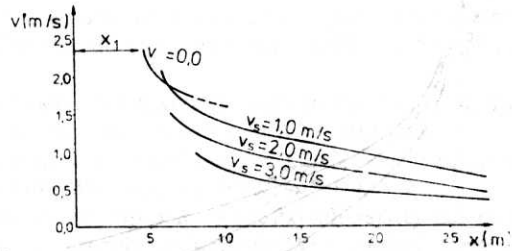
Z rysunku 6 wynika, iż wzrost prędkości v_0 jest głównym czynnikiem wzrostu prędkości wody w strumieniu, przy czym im v_0 jest większa tym wcześniej strumień osiąga dno szlaku żeglownego. Ponadto można zauważyć iż zmniejszenie prędkości strumienia na początkowym odcinku jest tym większe im większa była jej wartość w chwili osiągnięcia dna.

Na rysunku 7 przedstawiono zmienność $v_{sr} = f(x)$ w zależności od prędkości zestawu. Wynika z niego iż zmniejszenie prędkości zestawu v_s , przy stałej prędkości v_0 , powoduje wzrost prędkości wody w strumieniu względem dna. Tak więc każde zmniejszenie prędkości zestawu np. przy mijaniu, pokonywaniu zakola itp. nie będące wynikiem zmian obrotów śrub, zwiększa zagrożenie stabilności dna drogi wodnej. Na omawianym rysunku przedstawiono również przypadek manewrowy tj. ruszanie zestawu na wodzie stojącej, jego obrazem jest odcinek krzywej dla $v_s = 0$. Jak wynika z porównania prędkości wody w strumieniu jest to przypadek najbardziej niekorzystny dla stabilności dna.



Rys. 6. Zmienność prędkości wody względem dna $v=f(x)$ w zależności od v_0 ;

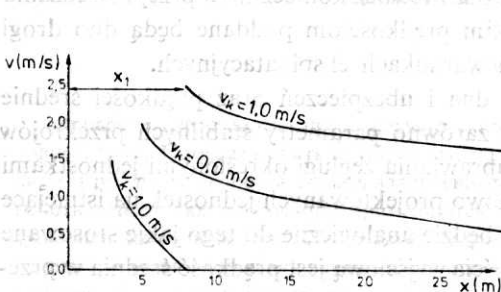
$v_s = 1,0$ m/s, $v_k = 0,0$ m/s, $H = 3,5$ m, $B = 57,0$ m, $I = 0,0$, $n = 0,025$



Rys. 7. Zmienność prędkości wody względem dna $v=f(x)$ w zależności od v_s ,

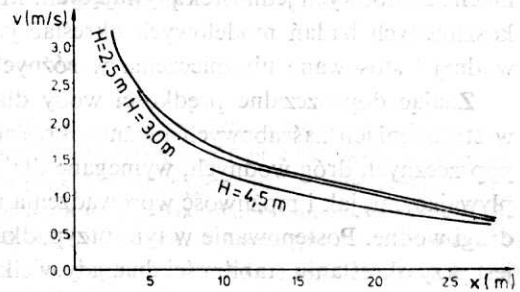
$v_0 = 7,0$ m/s, $v_k = 0,0$ m/s, $H = 3,5$ m, $B = 57,0$ m, $I = 0,0$, $n = 0,0025$

Na rysunku 8 przedstawiono z kolei wpływ prędkości wody na drodze wodnej na v_{sr} w strumieniu. Wynika z niego, że w przypadku gdy zestaw porusza się pod prąd, wzrost tej prędkości powoduje wzrost prędkości wody działającej na dno, wzrost odległości, w której strumień osiąga dno, a także zwiększenie zasięgu jego oddziaływania. Jak wynika z rys. 9 na zwiększenie prędkości wody oddziałującej na dno, bardzo mocno wpływa zmniejszenie głębokości, co potwierdza znany fakt, że zachowanie odpowiedniego dla danej mocy pędni-



Rys. 8. Zmienność prędkości wody względem dna $v=f(x)$ w zależności od v_k

$v_0 = 7,0$ m/s, $v_s = 2,0$ m/s, $H = 3,0$ m, $B = 57,0$ m, $I = 0,0$, $n = 0,025$

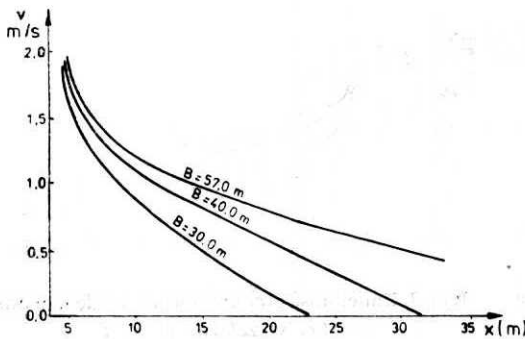


Rys. 9. Zmienność prędkości wody względem dna $v=f(x)$ w zależności od H

$v_0 = 7,0$ m/s, $v_k = 0,0$ m/s, $v_s = 10$ m/s, $B = 57,0$ m, $I = 0,0$, $n = 0,025$

ków, zapasu głębokości, jest bardzo skutecznym sposobem zabezpieczenia dna przed erozją. Biorąc pod uwagę poprzednio omówione zależności, można stwierdzić, że wartość tego zapasu zależy będzie również od prędkości wody na drodze wodnej i prędkości zestawu.

Na rysunku 10 przedstawiono zmienność $v_{sr}=f(x)$ w zależności od szerokości kanału. Wynika z niego, że szerokość kanału ma niezbyt duży wpływ na wartość prędkości w chwili osiągnięcia przez strumień dna, wpływa natomiast znacząco na zasięg oddziaływania strumienia. Fakt ten wytłumaczyć można tym, że w zjawisku rozprzestrzeniania się strumienia zaśrubowego główną rolę odgrywa porywanie przez strumień wody otaczającej. Prędkość porywania zależy od różnicy pomiędzy prędkością wody w strumieniu a wodą otaczającą. Przy określonych przepływach wody przez pędniki pchacza oraz przepływie wody na drodze wodnej, jej szerokość decydująca o przekroju poprzecznym, wpływać będzie na prędkość wody otaczającej, a zatem i na ilość wody porywanej przez strumień.



Rys. 10. Zmienność prędkości wody względem dna $v=f(x)$ w zależności od B
 $v_0=7,0$, $v_s=2,0$, $v_k=0,0$, $H=3,0$, $J=0,0$, $n=0,025$

7. Podsumowanie i uwagi końcowe

Przeprowadzona analiza i badania modelowe wykazują, iż wychodząc z równania pędu w postaci różniczkowej i wykorzystując numeryczne techniki obliczeniowe można uzyskać metodę stanowiącą przydatne narzędzie do określania średniej prędkości wody w strumieniach zaśrubowych jednostek pływających. Można więc bez konieczności przeprowadzania kosztownych badań modelowych określać jakim prędkościom poddane będą dno drogi wodnej i stosowane ubezpieczenia w różnych warunkach eksploatacyjnych.

Znając dopuszczalne prędkości wody dla dna i ubezpieczeń oraz prędkości średnie w strumieniach zaśrubowych można określać zarówno parametry stabilnych przekrojów poprzecznych dróg wodnych, wymagane dla uprawiania żeglugi określonymi jednostkami pływającymi, jak i możliwość wprowadzenia nowo projektowanych jednostek na istniejące drogi wodne. Postępowanie w tym przypadku będzie analogiczne do tego jakie stosowane jest przy określaniu stabilności dna, gdy wielkością wyjściową jest prędkość średnia w przekroju poprzecznym koryta rzeki.

Przedstawione w niniejszej pracy wyniki obliczeń numerycznych uzyskane zostały przy wykorzystaniu funkcji współczynnika Boussinesqa zbadanej w określonych warunkach oraz przy założeniu uproszczonego kształtu przekroju poprzecznego strumienia zaśrubowego.

W związku z tym przytoczne przykłady liczbowe dotyczą przypadków, dla których założenia te są słuszne. Uwzględnienie innych warunków rozplywania się strumienia np. przy nabrzeżu, wymagać będzie przyjęcia innych funkcji kształtu strumienia oraz funkcji określającej zmienność β . Ze względu na przyjęty algorytm nie wymaga to istotnych zmian w metodzie, a jedynie wprowadzenia do programu tych funkcji.

LITERATURA

1. G. N. ABRAMOWICZ, Teorie turbulentnych, strui. Moskwa 1960.
2. W. BALANIN, L. BYKOW, Wybór głównych wymiarów poprzecznych kanałów żeglugi oraz nowe metody ubezpieczeń brzegów, Materiały wybrane z XXI Kongresu Żeglugi. Warszawa 1967.
3. H. BERGH, K. CEDERWALL, Propeller Erossion in Harbours, XXV International Navigation Congress: Edynburg 1981.
4. W. BERGER, K. FELKEL, M. HAGER, H. OEBIUS, E. SCHALE, Courant provoqué par les bateaux protection des berges et solution pour éviter l'érosion du lit du Haut Rhin XXV, Int. Navigation Congress, Edynburg 1981.
5. M. FUEHRER, K. ROMISCH, Auswirkungen des modern Schiffsverkehrs auf die Binnen- und Seewasserstrassen sowie deren bauliche Anlagen. Wasser und Grundbau, heft 43, Berlin 1981.
6. S. JUNIEWICZ, Badania nad zastosowaniem aeratora grzebieniowego w laboratoriach wodnych. Prace naukowe Instytutu Geotechniki Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 1979.
7. L. PAWLIK, Oddziaływanie strumienia generowanego napędami jednostki pływającej na drogę wodną. Praca doktorska, Maszynopis, Instytut Geotechniki Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1984.
8. W. ROBAKIEWICZ, Teorie i badania hydrauliczne stosowane przy analizie zjawiska strumienia zaśrubowego. Rozpr. Hydrot. z. 19/1966.
9. W. ROBAKIEWICZ, Wpływ działania strumienia zaśrubowego na dno przy nabrzeżu stanowiska prób na uwięzi, na przykładzie badań modelowych i terenowych z trawlerem B-20. Rozpr. Hydrot. z. 19/1966.
10. K. ROMISCH, Der Propellerstrahl als erodierendes Element bei An- und Ablegemanovern in Hafenecken. Seewirtschaft, nr 7/1975.
11. G. N. SIZOW, Rabota zatoplennoi gidromonitornei strui. Moskwa 1953.

Определение скорости струи воды, вызванной действием двигателя плавающих точек

Содержание

В работе представлен способ расчета скорости воды в завинченных струях, действующих на водный путь. Проведен краткий обзор выбранных работ, авторы которых занимались исследованием и расчетом скорости воды в завинченных струях. На основе этих работ определено, что разработанные до сих пор методы применяются только в некоторых эксплуатационных случаях, выступающих на водном пути. Это следует из факта, что они предусматривают не все факторы, отличающие условия растекания завинченных струй. Факторами, связанными с водным путем признаны: ширина и глубина корыта водного пути, уклоны зеркала воды и ее скорость, а также шерсткость дна водного пути. В свою очередь, факторами, связанными с плавающей точкой будут: форма кормы, вид и количество рулей, скорость движения точки, повороты винта и глубина погружения.

В связи с большим количеством факторов, влияющих на разнородность условий распыливания завинченных потоков, сложно предложить, при настоящем состоянии знаний, общий метод опре-

деления разложения скорости в поперечном сечении завинченной струи. Но можно, и то с хорошим приближением определить среднюю скорость в поперечных сечениях вдоль пути его распространения. Для этой цели в работе использовано и интегральное уравнение скорости. В этом уравнении предусмотрены силы гидродинамического напора, силы трения, а также силы тяжести, следующих из уравнения спада зеркала воды на водном пути. Предусмотрено также влияние увлечения воды, охватывающей струю. Обсуждаемое уравнение, после соответственных изменений и упрощений, а также дополнений функциями, определяющими увлечение воды и изменение коэффициента Буассинеса, служило основанием для разработки программы численных расчетов, позволяющих определить изменения скорости воды, а также ширину и поверхность поперечного течения струи вдоль пути ее распространения. Для численных расчетов использован метод Рунге-Кутты четвертого ряда.

Результаты расчетов верифицировались в полевой лаборатории института геотехники Вроцлавского политехнического института. Исследования проводились на модели международного водного пути IV класса, выполненного в масштабе 1 : 20, а также на модели толкаемого состава, состоящего из баржи А III и толкача Буйвол. После определения согласованности результатов расчетов с результатами экспериментов, проведен ряд расчетов завинченной струи в различных эксплуатационных условиях. Результаты этих расчетов представлены в диаграммах, позволяющих оценить влияние отдельных факторов, решающих об условиях распространения струи на скорость воды, действующей на дно водного пути. На их основании решено, что водный путь будет подвергаться различным скоростям действующей воды, в зависимости от локальных глубин, струй дуг, имеющих влияние на редукцию скорости суден, а также напряжение потоков воды в поперечном сечении судоходного пути.

Determination of water flow rates caused by operating of craft propellers

Summary

In this paper the method of calculation of water flow rates in the discharge currents affecting the waterway, has been presented. Brief review of the selected works, elaborated by the authors who dealt with testing and calculating of the water flow rates in the discharge currents, is made. On a basis of these reports it has been found that hitherto elaborated methods can be applied only in few navigation cases occurring in the waterway. It appears from the fact that not all factors differentiating the conditions of discharge currents' propagation are included in these methods. The factors associated with the waterway comprise a width and a depth of the river bed, free surface slope and water flow rate and also roughness of the river bottom. The factors associated with the craft include stern shape, type and number of the propellers, number of rudders, speed of craft travel, rotations of screw propellers and depth of draught.

Because of considerable number of factors influencing the variety of the conditions of the discharge current propagation it is difficult to propose, at the present level of science, a general method of determination of rate distributions in the cross-section of the discharge current. However, the mean rate in the cross-sections along the route of its propagation can be determined with high approximation. For this purpose a differential equation of momentum was used. In this equation the forces of hydrodynamic pressure, friction and gravity, caused by the free surface slope occurring in the waterway, have been included. Phenomena of entrainment of the water surrounding the current has also been considered. This equation, after adequate transformations and reductions and after completion with the functions determining water entrainment and modification of the Boussinesq's coefficient, was the basis for elaboration of numerical calculation program which allows for determination of variations in water flow rate and for determination of the width and area of the cross-section of the current according to the route of its propagation. The Runge-Kutta's method of 4th grade has been used in numerical calculations.

The results of calculations have been verified in the field laboratory of the Institute of Geotechnics at Technical University of Wrocław. The investigations were carried out on the model of IV international

class waterway, made in a scale of 1 : 20 and on the model of the push tow composed of A III barge and Bawól II pushertug. After confirming the calculation results with the results of the experiments, a number of calculations of the discharge current in different operational conditions was made. The results of the investigations are presented in the diagrams which enable the estimation of the influence of individual factors, decisive for the conditions of current propagation, on water flow rates influencing the river bottom. On a basis of these results it has been found that the waterway will be submitted to different rates of affecting water flow depending on the local depth and the radii of meanders influencing the reduction of the craft speed and water flow intensity in the waterway cross-section.