

BADANIA WARUNKÓW RÓWNOWAGI HYDRODYNAMICZNEJ W PRZEPLAWKACH DWUFUNKCYJNYCH

BEDLOAD EQUALIBRIUM MEASUREMENTS ALONG CANOE-FISHWAYS

Wojciech Bartnik, Leszek Książek, Maciej Wyrębek,
Mateusz Strutyński

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Streszczenie. Przeplawka dwufunkcyjna jest nowym rozwiązaniem przeplawki dla ryb. Dodatkową zaletą takiego rozwiązania jest możliwość przetransportowania przez nią kajaków bez ryzyka ich zniszczenia. W przeplawce tego typu w celu zwiększenia oporów przepływu w pole prędkości wprowadza się elementy z tworzywa sztucznego przypominające roślinność. Występuje tutaj podział profilu prędkości na dwie części: strefę zmniejszonych prędkości na wysokości szczotek i strefę zwiększonych prędkości ponad szczotkami. W przeplawce z podwójnym dnem współczynnik dyssypacji energii jest wysoki, ponieważ duża ilość pojedynczych elementów z tworzywa sztucznego powoduje tworzenie się dużej ilości mikrowirów, gdzie zostaje wytrącona prędkość płynącej wody.

Abstract. The Canoe-fishway is a rather new concept of fishways. A lot of thin and elastic elements were used to built it – it works like vegetation. The big advantage of this type of construction is that it may be used by kayaks and canoes to pass an obstruction in the river without danger of destroy it. The velocity profile is divide for two part: lower velocity on the brushes level and higher velocity above the brushes. Energy dissipation within this type of fishways is very effective. The large number of bristles produce many small vortex which initiate energy consumption by the velocity of water.

Słowa kluczowe: przeplawka dwufunkcyjna, dno stabilne, naprężenia w dnie, rozkład prędkości

Key words: rock fishway, river bed stability, bottom shear stresses, velocity profile

Adres do korespondencji – Corresponding authors: prof. dr. hab. inż. Wojciech Bartnik, dr. hab. inż. Leszek Książek, mgr inż. Maciej Wyrębek, dr. inż. Mateusz Strutyński, Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków, e-mail: m.wyrebek@gmail.com, rmksiaze@cyf-kr.edu.pl.

Podziękowania: Badania zrealizowano w ramach Projektu Rozwojowego Nr N R14 0041 06/2009 Narodowego Centrum Badań i Rozwoju.

WSTĘP

W przepławce dwufunkcyjnej w celu zwiększenia oporów przepływów w pole prędkości wprowadza się elementy z tworzywa sztucznego przypominające roślinność.

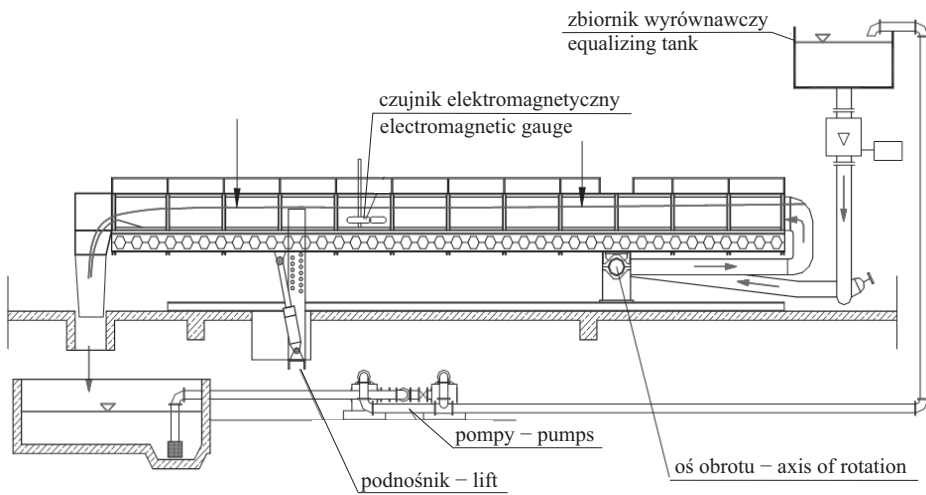
Przepławki tego typu są szeroko stosowane w Niemczech, Austrii i Szwajcarii [Hassinger i Kraetz 2002]. W literaturze mogą one występować pod różnymi nazwami: przepławka z podwójnym dnem lub przepławka dwufunkcyjna (*canoe fishway*). Obie te nazwy wskazują na podwójną funkcję tej przepławki – pierwsza polega na umożliwianiu rybom wędrówki w górę rzeki, druga pozwala przeprowadzać przez przepławkę sprzęt wodny bez ryzyka jego zniszczenia. Pierwsze dno jest to dno żwirowe dla ryb i innych organizmów wodnych, drugie zaś to elastyczne dno z tworzywa sztucznego dla sprzętu wodnego (łódzie, kajaki).

Warunki hydrauliczne przepływu w przepławce dwufunkcyjnej są odmienne od tych, które występują w najczęściej stosowanych przepławkach typu komorowego (chodzi o przepławki komorowe, szczelinowe, ryglowe oraz step-pool fishways). W przepławkach komorowych ryba przepływa w górę, pokonując sekwencje przegród zaopatrzonych w otwory lub szczeliny, gdzie panują większe prędkości wody. Następnie napotyka na strefę, gdzie prędkość wody jest dużo mniejsza – czyli basen. Prędkość w szczelinie nie powinna przekraczać krytycznych prędkości przepływu dla poszczególnych gatunków ryb. Podczas projektowania przepławek, przyjmuje się następujące prędkości graniczne: ryby łososiowate – $2,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, ryby karpiozate – $1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, pozostałe gatunki – $1,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ [Wiśniewolski 2008, Mokwa 2010, Bartnik i in. 2011]. W basenie prędkość powinna być odpowiednio mniejsza, taka aby ryba mogła tam odpocząć przed pokonaniem następnej przegrody. Z reguły przyjmuje się prędkość wody w basenie wynoszącą ok. $v_{\text{basen}} = 0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. W przepławkach dwufunkcyjnych brak jest komór, w związku z czym warunki przepływu są bardziej jednorodne ze względu na rozproszenie energii na długości. W przepławce tego typu współczynnik dyssypacji energii jest wysoki, ponieważ duża liczba pojedynczych elementów z tworzywa sztucznego powoduje tworzenie się dużej ilości mikrowirów, w których zostaje wytrącona prędkość płynącej wody [Hassinger i Kraetz 2002]. W przepławce komorowej (ryglowej) przy opływie większych elementów można wyróżnić następujące etapy: przepływ przez szczelinę (rygiel), zmniejszenie przekroju poprzecznego, zwiększenie prędkości, wpłynięcie wody do basenu, zwiększenie przekroju poprzecznego, zmniejszenie prędkości, tworzenie się większych wirów i w końcu dyssypacja energii w mikrowirach. Proces dyssypacji energii w przepławce szczotkowej jest bardziej wydajny, ponieważ od razu dochodzi do formowania się mikrowirów.

Celem pracy było określenie wpływu elastycznych elementów z tworzywa sztucznego na hydrauliczne warunki przepływu wody oraz określenie warunków stabilności dna przepławki.

POMIARY LABORATORYJNE

Pomiary przeprowadzono w Laboratorium Hydrotechnicznym Wydziału Inżynierii Wodnej i Geotechniki Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie. Długość koryta hydraulicznego wynosi 12 m, z czego 8 m jest przeszklone. Wymiary przekroju poprzecznego: wys. 0,6 m × szer. 0,485 m. Spadek można regulować skokowo w zakresie od –25,6% do 84,7%. Układ zasilający koryta w wodę działa w obiegu zamkniętym [Książek 2000]. Schemat działania koryta hydraulicznego przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat koryta hydraulicznego [Książek 2000]

Fig. 1. Schema of laboratory flume [Książek 2000]



Rys. 2. Kanał migracji ryb na modelu przeplawki dwufunkcyjnej

Fig. 2. Channel used for migration by fishes in fish ladder model

Model przepławki dwufunkcyjnej obejmował 5-metrowy odcinek koryta. Pojedyncze elastyczne elementy z tworzywa sztucznego zostały zebrane w skupiska o wymiarach $0,08 \times 0,30$ m, następnie ułożone naprzemiennie po lewej i prawej stronie koryta hydraulicznego. Spowodowało to wydłużenie utworzonego w ten sposób kanału służącego migracji ryb (rys. 2). Odcinek badawczy składał się z 20 takich elementów. Pomiary przeprowadzono dla trzech średnic rumowiska: $d_1 = 0,01\text{--}0,02$ m, $d_2 = 0,02\text{--}0,04$ m, $d_3 = 0,04\text{--}0,06$ m.

Prędkość wody została zmierzona przy użyciu akustycznego prędkościomierza dopplerowskiego oraz mikromłynka. Przepływ odczytano z wodomierza.

SONDAADV

Akustyczny prędkościomierz dopplerowski ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) to jednopunktowy miernik, który dokonuje dokładnego pomiaru trzech składowych prędkości wody zarówno dla bardzo dużego, jak i skrajnie małego przepływu. Pomiar odbywa się w strefie komórki pomiarowej zlokalizowanej odległości 0,05 m od czoła sondy. Sonda składa się z umieszczonego centralnie pojedynczego nadajnika oraz odbiorników rozlokowanych na ramionach bocznych. Nadajnik generuje wiązkę fali akustycznej, natomiast wysokoczułe odbiorniki odbierają sygnały powstające na skutek odbicia tej fali od znajdujących się w wodzie cząsteczek (np. zawiesiny, pęcherzyków powietrza). Rozdzielczość uzyskiwanych wyników $\pm 0,0001$ m \cdot s⁻¹. Uzyskane wyniki składowych prędkości poddane zostają procedurze sprawdzającej [Goring i Nikora 2002, Książek i in. 2011].

MIKROMŁYNEK

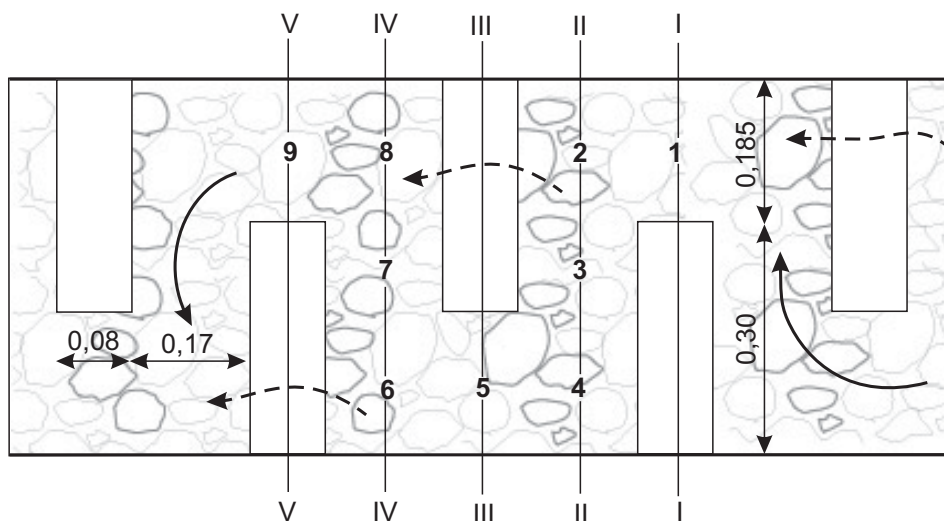
Mikromłynek jest urządzeniem mechanicznym. Na urządzenie składają się 2 mikromłynki o średnicy śmigiełka 0,008 m, sonda i rejestrator. Jeden mikromłynek służy do pomiaru prędkości w granicach $0\text{--}1,5$ m \cdot s⁻¹, drugi $0\text{--}3,0$ m \cdot s⁻¹. Urządzenie rejestrujące generuje sygnał o określonej częstotliwości, który jest modyfikowany pojemnościowo przez przechodzenie łopatek młynka obok czujnika. W Katedrze Inżynierii Wodnej i Geotechniki Uniwersytetu Rolniczego urządzenie zostało zmodyfikowane – sygnał jest przekazywany poprzez złącze RS32 do komputera PC. Rozdzielczość uzyskiwanych wyników $\pm 0,0001$ m \cdot s⁻¹.

METODYKA

Pomiar składowych prędkości v_x , v_y oraz v_z przeprowadzono w 11 pionach. Każdy pion hydrometryczny składał się z ok. 10 pomiarów. W strefie przydennej pomiaru prędkości dokonano za pomocą sondy ADV. Pomiar mikromłynkiem był wykonywany w strefie powyżej szczotek, gdzie dominującym kierunkiem przepływu wody był kierunek zgodny ze spadkiem koryta.

Pomiary wykonano przy przepływie $Q = 0,039$ m³ \cdot s⁻¹ i spadku dna $I = 0,0083$ dla trzech różnych frakcji rumowiska na dnie koryta:

- $d_1 = 0,01\text{--}0,02$ m; $d_{\text{sr}} = 0,015$ m,
- $d_2 = 0,02\text{--}0,04$ m; $d_{\text{sr}} = 0,030$ m,
- $d_3 = 0,04\text{--}0,06$ m; $d_{\text{sr}} = 0,050$ m.



Rys. 3. Schemat modelu przeplawki dwufunkcyjnej z zaznaczonymi pionami pomiarowymi
 Fig. 3. Distribution of velocity measurement points in fish ladder model

Dla każdego wariantu pomiarowego wykonano serię pomiarów prędkości przepływu wody w pionach, które podzielono na grupy, opierając się na warunkach hydraulicznych przepływu i rozmieszczeniu w przeplawce (rys. 3):

- pion 1, 5 i 9 – obok szczotek,
- pion 2 i 6 – przed szczotkami,
- pion 3 i 7 – pomiędzy szczotkami,
- pion 4 i 8 – za szczotkami,
- pion 11 i 12 – wewnątrz i nad szczotkami.

Dodatkowo wykonano pomiar na odcinku koryta bez szczotek – pion v_4 .

Pomiar zwierciadła wody przeprowadzono na badanym odcinku w pięciu przekrojach (I–V).

Na podstawie pomiaru trzech składowych prędkości narysowano wektory prędkości – długość wektora odpowiada jego wartości. Posłużyło to do wykreślenia profili prędkości, na podstawie których obliczono średnie prędkości przepływu wody (tab. 1). W celu zbadania wpływu szczotek na warunki przepływu profile prędkości podzielono na dwie części: od dna do górnej krawędzi szczotek – h_1 , oraz powyżej szczotek – h_2 (rys. 4).

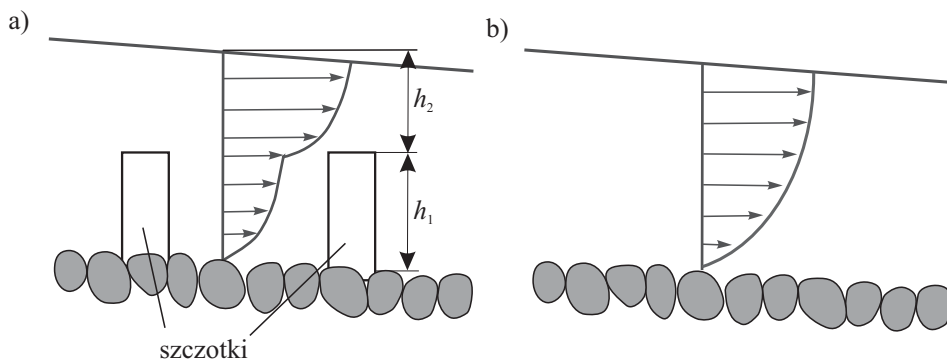
Intensywność turbulencji obliczono ze wzoru [Jeżowiecka-Kabsch i Szewczyk 2001, Lewandowski 2006]:

$$it = \frac{\sqrt{\frac{1}{3}(u_x'^2 + u_y'^2 + u_z'^2)}}{\bar{u}} \quad (1)$$

gdzie:

- it – intensywność turbulencji,
- $\overline{u_x'^2}$ – pulsacja prędkości w kierunku x,

$\overline{u_y'^2}$ – pulsacja prędkości w kierunku y ,
 $\overline{u_z'^2}$ – pulsacja prędkości w kierunku z ,
 \overline{u} – prędkość uśredniona w czasie.



Rys. 4. Schemat profili prędkości: a) przepławka dwufunkcyjna, b) koryto bez szczotek
 Fig. 4. Shape of velocity profile: a) canoe-fishway, b) flume without brushes

Naprężenia graniczne obliczono z zależności [Bartnik 1992]:

$$\tau_{gy} = f_m \cdot d_m \cdot \Delta\gamma_s, \quad \text{N} \cdot \text{m}^{-2} \quad (2)$$

gdzie:

f_m – naprężenia styczne = 0,035,

d_m – średnica miarodajna rumowiska, m.

$\Delta\gamma_s$ – różnica ciężaru objętościowego rumowiska i wody, $\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$,

Prędkość dynamiczną obliczono ze wzoru:

$$v_* = \frac{s}{5,75} \quad (3)$$

gdzie:

s – nachylenie prostej zgodne z wzorem: $v = s (\log y) + b$, w którym: v – prędkość wody, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, y – względne napełnienie, b – wartość stała.

Wzór (3) jest możliwy do zastosowania, gdy profil prędkości w skali półlogarytmicznej przybiera postać zbliżoną do prostej [Gordon i in. 2004]. Pozwala to na obliczenie naprężeń ścinających:

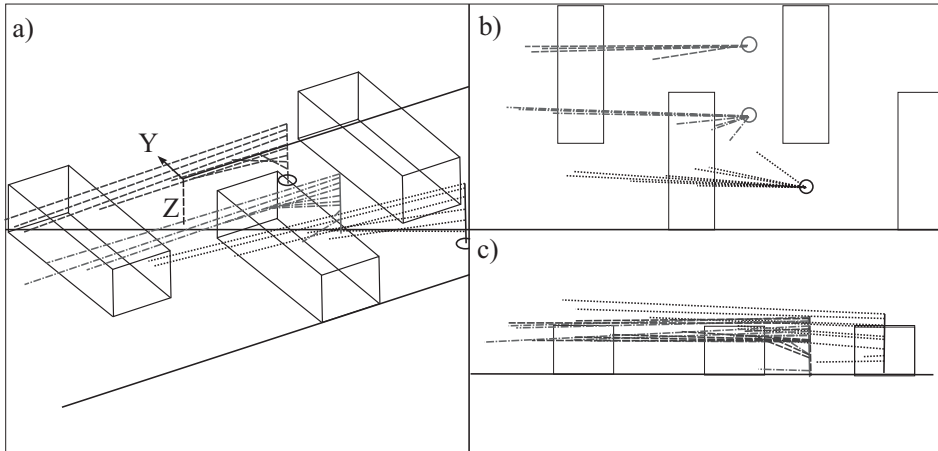
$$\tau = \rho \cdot v_*^2, \quad \text{N} \cdot \text{m}^{-2} \quad (4)$$

gdzie:

ρ – gęstość cieczy, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

WYNIKI

Rys. 5 przedstawia wyniki pomiarów prędkości sondą ADV. Pomiary trzech składowych prędkości pozwoliło na określenie wartości i kierunku przepływu wody.



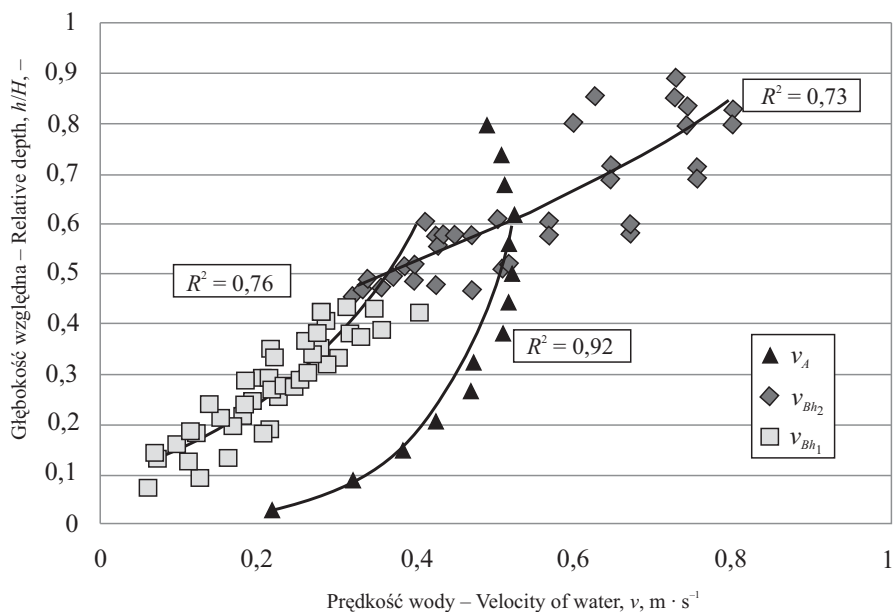
Rys. 5. Wizualizacja rezultatów pomiaru prędkości przy $Q = 0,039 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $I = 0,0083$, d_2 : a) widok trójwymiarowy b) widok z góry, c) widok z boku

Fig. 5. Visualization of velocity measurement przy $Q = 0,039 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $I = 16,7 \%$, d_2 : a) 3D view b) top view, c) side view

Tabela 1. Średnie prędkości wody powyżej szczotek (h_2) i na wysokości szczotek (h_1) przy $Q = 0,039 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $I = 0,0083$, dla rumowiska o średnicach d_1 , d_2 i d_3

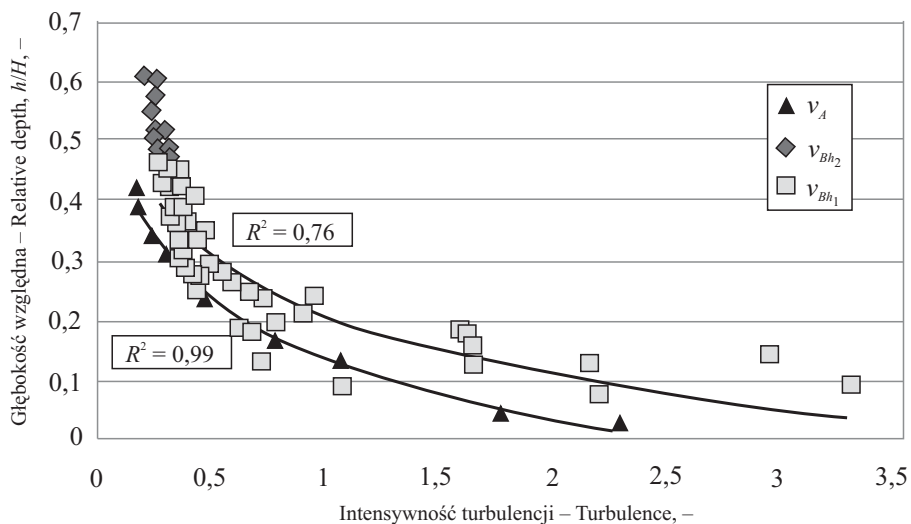
Table 1. Mean velocity of water above brushes (h_2) and on the brushes level (h_1), $Q = 0,039 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $I = 0,0083$ for bedload material d_1 , d_2 and d_3

Pion Point	Prędkość średnia – Mean velocity, v_{sr} , $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$					
	d_1		d_2		d_3	
	h_2	h_1	h_2	h_1	h_2	h_1
1	0,52	0,21	0,54	0,20	0,52	0,23
2	0,59	0,20	0,62	0,21	0,58	0,16
3	0,79	0,09	0,78	0,10	0,80	0,17
4	0,72	0,09	0,62	0,08	0,75	0,19
5	0,68	0,16	0,65	0,16	0,71	0,24
6	0,71	0,22	0,64	0,15	0,66	0,15
7	0,79	0,17	0,78	0,18	0,80	0,16
8	0,63	0,12	0,63	0,16	0,62	0,11
9	0,61	0,16	0,58	0,16	0,63	0,19
11	0,74	0,01	0,68	0,07	0,76	0,07
12	0,54	0,03	0,56	0,05	0,48	0,02



Rys. 6. Profil prędkości przy $Q = 0,039 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $I = 0,0083$: v_A – koryto bez szczotek, v_B – przepławka dwufunkcyjna, pomiary do wysokości h (v_{Bh_1}) i ponad szczotkami h_2 (v_{Bh_2})

Fig. 6. Velocity profile for $Q = 0,039 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $I = 0,0083$: v_A – flume without brushes, v_B – canoe-fishway, measurements up to top of brushes h_1 (v_{Bh_1}) and over top of brushes h_2 (v_{Bh_2})



Rys 7. Intensywność turbulencji dla przepływu $Q = 0,039 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $I = 0,0083$: v_A – koryto bez szczotek, v_B – przepławka dwufunkcyjna, pomiar do wysokości h_1 (v_{Bh_1}) i ponad szczotkami h_2 (v_{Bh_2})

Fig. 7. Turbulence for $Q = 0,039 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $I = 0,0083$: v_A – flume without brushes, v_B – canoe-fishway, up to top of brushes h_1 (v_{Bh_1}) and over top of brushes h_2 (v_{Bh_2})

Tab. 1 przedstawia średnie prędkości wody dla średnicy rumowiska $d_1 = 0,015$ m, $d_2 = 0,030$ m i $d_3 = 0,05$ m. Największe różnice pomiędzy prędkością wody na wysokości szczotek h_1 i ponad szczotkami h_2 zaobserwowano w pionach hydrometrycznych znajdujących się bezpośrednio poniżej szczotek (piony 3, 4, 7, 8). Stwierdzono brak wpływu średnicy rumowiska na prędkości wody w strefie przydennej.

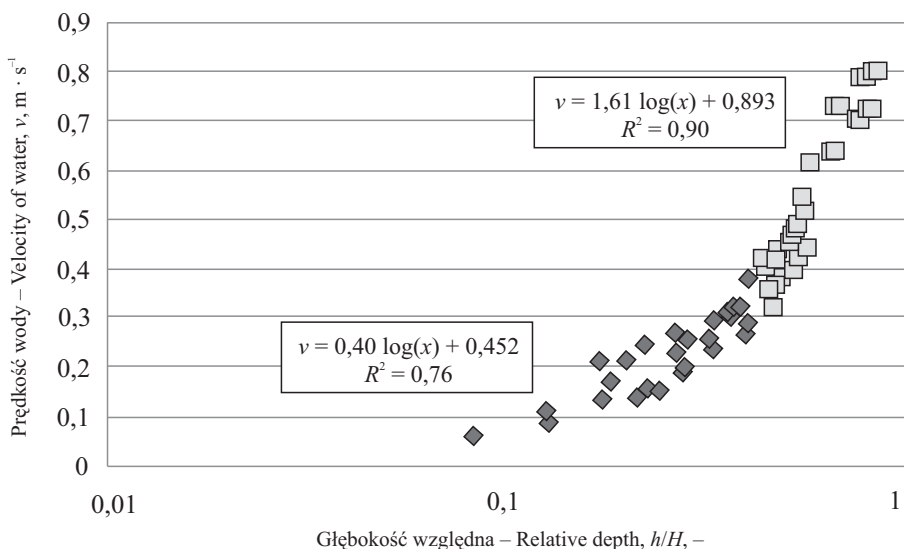
Porównanie pomiarów laboratoryjnych dla przepławki dwufunkcyjnej i koryta bez szczotek przedstawiono na rys. 6 i 7. Rys. 6 przedstawia pomiar prędkości dla 9 pionów znajdujących się w kanale przepławki v_B i jednego dla koryta hydraulicznego bez szczotek v_A . Obecność szczotek przyczyniła się do zmniejszenia prędkości wody przy dnie do wysokości h_1 , natomiast zwiększenia prędkości ponad szczotkami h_2 . Obecność szczotek wpłynęła na zwiększenie intensywności turbulencji (rys. 7).

Naprężenia graniczne obliczone ze wzoru 2 wynoszą:

- rumowisko $d_1 = 0,01-0,02$ m; $d_{sr} = 0,015$ m – $\tau_{gr} = 8,66$ N · m⁻²
- rumowisko $d_2 = 0,02-0,04$ m; $d_{sr} = 0,030$ m – $\tau_{gr} = 17,33$ N · m⁻²
- rumowisko $d_3 = 0,04-0,06$ m; $d_{sr} = 0,050$ m – $\tau_{gr} = 28,88$ N · m⁻²

Rys. 8 przedstawia profil prędkości w skali półlogarytmicznej dla pionów znajdujących się przed szczotką 2 i 6. W pionach tych występują zróżnicowane warunki hydrauliczne przepływu wody na wysokości pierwszego dna służącego migracji ryb i drugiego służącego spławianiu sprzętu wodnego.

Tab. 2 przedstawia wyniki obliczeń prędkości dynamicznej (wzór 3) i naprężeń ścinających (wzór 4). Dla pionów zlokalizowanych za szczotkami (piony 3, 4, 7 oraz 8), do wysokości górnej krawędzi szczotek nie jest logarytmiczny rozkład prędkości, o czym świadczy wartość współczynnika determinacji mniejsza od 0,62. W tych pionach naprężeń ścinających nie można liczyć metodą opartą na logarytmicznym rozkładzie prędkości.



Rys. 8. Profil prędkości w skali półlogarytmicznej dla pionów 2 i 6

Fig. 8. Velocity distribution – point 2 and 6; X-axis is logarithmic scale

W pionach hydrometrycznych 1, 2, 5, 6 oraz 9 wartości naprężeń w strefie przydennej wynoszą ok. $4,5 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$. Stwierdzono, że dno przepławki dwufunkcyjnej przy przepływie $Q = 0,039 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ i spadku dna $I = 0,0083$ jest stabilne, ponieważ wartości naprężeń granicznych nie zostały przekroczone, tj. $\tau < \tau_{gr}$. Obecność elastycznych elementów różnicujących warunki przepływu powoduje redukcję naprężeń stycznych o rząd wielkości w stosunku do naprężeń powyżej ich górnej krawędzi (tab. 2).

Tabela 2. Wyniki obliczeń prędkości dynamicznej i naprężeń ścinających
Table 2. Calculated shear velocities and shear stresses

Pion hydrometryczny Measuring point		R^2	S	u_*	τ $\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$
1, 5 i 9	h_2	0,74	1,39	0,24	58,5
	h_1	0,77	0,37	0,06	4,2
2 i 6	h_2	0,90	1,61	0,28	78,6
	h_1	0,79	0,40	0,07	4,8
3 i 7	h_2	0,83	1,34	0,23	54,0
	h_1	0,61	–	–	–
4 i 8	h_2	0,71	2,03	0,35	124,8
	h_1	0,24	–	–	–

WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów stwierdzono, że obecność elastycznych elementów wywiera decydujący wpływ na hydrauliczne warunki ruchu wody panujące w przepławce.

- Obecność elastycznych elementów z tworzywa sztucznego dzieli strumień wody na dwie części, powodując zmniejszenie prędkości wody w warstwie przydennej sięgającej ich górnej krawędzi oraz zwiększenie prędkości przepływu wody ponad nimi.
- Elementy z tworzywa sztucznego zaburzają logarymiczny rozkład profilu prędkości w warstwie przydennej w pionach zlokalizowanych bezpośrednio za nimi (piony 3, 4 oraz 7, 8). W pionach tych nie ma możliwości obliczenia naprężeń stycznych metodą opartą na logarymicznym rozkładzie prędkości,
- Rumowisko o średnicach w przedziale 0,01–0,06 m nie ma wpływu na rozkłady prędkości wody w strefie przydennej.
- Naprężenia styczne na dnie osiągały wartości ok. $4 \text{ N} \cdot \text{m}^{-3}$. W strefie rozdziału dwóch strug, na wysokości drugiego dna (powierzchnia szczotek) naprężenia styczne są o rząd wielkości większe niż na dnie.

Wykorzystanie elementów z tworzywa sztucznego w przepławkach dwufunkcyjnych obniża prędkości przy dnie, zapewnia spełnienie warunków równowagi hydrodynamicznej ($\tau < \tau_{gr}$) oraz umożliwia bezpieczny transport sprzętu wodnego bez ryzyka jego zniszczenia.

PIŚMIENNICTWO

- Bartnik W., 1992. Hydraulika potoków z dnem ruchomym. Początek ruchu rumowiska. Zesz. Nauk. AR w Krakowie, Rozpr. hab. 171, 61–67.
- Bartnik W., Epler P., Jelonek M., Klaczak A., Książek L., Mikołajczyk T., Nowak M., Popek W., Sławińska A., Sobieszczyk P., Szczerbik P., Wyrębek M., 2011. Gospodarka rybacka w aspekcie udrażniania cieków dorzecza Małej i Górnej Wisły. Red. P. Epler, L. Książek. Zesz. Nauk. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich. PAN, Oddz. w Krakowie, Komis. Tech. Inf. Wsi, Monografia 13, s. 230.
- Gordon N.D., McMahon T.A., Finlayson B.L., Gippel C.J. Nathan R.J., 2004. Stream Hydrology. An Introduction for Ecologists. John Wiley & Sons, Ltd Hoboken.
- Goring D.G., Nikora V.I., 2002. Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data. J. Hydr. Engin. 128(1), 117–126.
- Hassinger R., Kraetz D. 2002, The Canoe-Fishway – A Combination of Fish Migratory Facility and Canoe Passage in the same Channel. URL: <ftp://ftp.cs.kun.nl/pub/TWM/academic%20year%202007%202008/OERM%202007%20course%20documents/2%20Exursion%20Velt%20andVecht/CanoeFishway.pdf> (1.03.2012).
- Książek L., 2000, Proces deformacji dna koryta potoku górskiego i jego związek z siłą wleczenia pojedynczych ziaren rumowiska. Praca doktorska. Maszynopis. UR Kraków.
- Książek L., Bartnik W., Rumian J., Zagórowski P., 2011. Turbulent water flow over rough bed. Cz. I. IOP Publishing. J. Phys.: Conf. Ser. 318 022012, http://iopscience.iop.org/1742-6596/318/2/022012/pdf/1742-6596_318_2_022012.pdf.
- Jeżowiecka-Kabsch K., Szewczyk H., 2001, Mechanika płynów. Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej Wrocław.
- Lewandowski J.B., 2006, Mechanika płynów. Wyd. UP Poznań.
- Mokwa M., 2010. Obliczenia hydrauliczne przepławek dla ryb, Acta Sci. Pol., ser. Formatio Circum. 9(2), 43–58.
- Wiśniewolski W., 2008, Migracje ryb – przyczyny, zagrożenia możliwości ochrony. [W:] Ochrona ichtiofauny w rzekach z zabudową hydrotechniczną. Monografia. Red. M. Mokwa, W. Wiśniewolski. Dolnośląskie Wyd. Edukacyjne Wrocław, 9–19.

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 12.12.2012