

CHARAKTERYSTYKA RUCHU WŁECZONEGO RUMOWISKA PIASZCZYSTEGO W MAŁYM CIEKU NIZINNYM

Zbigniew Popek

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych i terenowych dotyczących charakterystyki ruchu piaszczystego rumowiska wleczonego w warunkach przepływu ustalonego i nieustalonego. Badania laboratoryjne naprężeń granicznych wykonano w korycie hydraulicznym z płaskim dnem ruchomym, uformowanym z piasków o zróżnicowanej charakterystyce uziarnienia. Charakterystykę zmienności natężenia wleczenia oparto na wynikach badań terenowych, wykonanych w korycie nizinnej rzeki Zagożdżonki. W badaniach tych wykorzystano łapacz rumowiska wyposażony w aparaturę do ciągłego pomiaru intensywności wleczenia.

Słowa kluczowe: piasek rzeczny, początek ruchu ziaren, natężenie wleczenia

WSTĘP

Jednym z podstawowych zagadnień w badaniach procesów fluwialnych w korytach rzecznych jest określenie warunków granicznych, w których rozpoczyna się ruchu ziaren materiału dennego. W rzekach nizinnych dominuje piaszczysty materiał korytowy o zróżnicowanych charakterystykach uziarnienia. Z tego względu dobre rozpoznanie właściwości materiału korytowego ma kluczowe znaczenie dla określenia warunków granicznych, a w konsekwencji dla poprawności oceny intensywności ruchu rumowiska wleczonego.

W wyniku przekroczenia naprężeń granicznych pojedyncze ziarna materiału dennego zaczynają się poruszać: toczą się, przesuwiają lub wykonują ruchy skokowe. Forma ruchu lub jego brak zależy od wzajemnego ułożenia ziaren na dnie oraz związanego z tym tzw. efektu ekspozycji i ukrycia ziaren, który jest tym większy, im większa jest niejednorodność uziarnienia materiału dennego. Efekt ekspozycji i ukrycia ziaren objawia się tym, że ziarna większe uruchamiane są łatwiej, ponieważ zwykle są bardziej wyeksponowane – „wystają” ponad średni poziom powierzchni dna; natomiast ziarna mniejsze pozostają ukryte (zaklinowane) pomiędzy większymi, przez co trudniej się uruchamiają.

Adres do korespondencji – Corresponding author: dr hab.inż. Zbigniew Popek, Katedra Inżynierii Wodnej, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, ul. Nowoursynowska 159, 02-787 Warszawa, e-mail: zbigniew_popek@sggw.pl.

Istotną cechą ruchu rumowiska piaszczystego jest to, że przy wzroście prędkości przepływu (naprężenia stycznego) zbiorowisko poruszających się ziaren zaczyna tworzyć tzw. formy denne (fale piaszczyste), których wymiary i kształt zależą od parametrów hydraulicznych strumienia. W dolnym obszarze przepływu wraz ze wzrostem prędkości powstają kolejno: zmarszczki, zmarszczki na fałdach i fałdy. Ogólnie rzecz biorąc, formy denne mają w przekroju podłużnym kształt trójkątny z wydłużoną, łagodnie wznoszącą się częścią od strony napływu wody i stromo opadającą częścią za krawędzią grzbietową. Różnią się między sobą wysokością i długością.

Przemieszczanie się form po dnie rzeki powoduje dużą zmienność chwilowego natężenia wleczenia w przekroju poprzecznym koryta. Największa intensywność wleczenia występuje w momencie przechodzenia przez dany przekrój grzbietów form dennych. Z tego względu, nawet w warunkach ustalonego przepływu wody ruch rumowiska wleczonego zawsze ma charakter ruchu nieustalonego. Natomiast w czasie wezbrań, tj. w warunkach przepływu nieustalonego, dodatkowym czynnikiem wpływającym na zmienność intensywności wleczenia stają się zmiany oporów przepływu wody związane ze zmianami wysokości form dennych (chropowatości dna), a w przypadku wąskich koryt rzecznych ($B/h < 20$) – wiążące się również z oddziaływaniem brzegów.

WARUNKI GRANICZNE RUCHU ZIAREN PIASZCZYSTYCH

Ziarno określonej wielkości przejdzie ze stanu spoczynku w ruch, gdy naprężenie styczne na dnie τ_o przekroczy naprężenie graniczne τ_{gr} ($\tau_o > \tau_{gr}$) charakterystyczne dla danego materiału aluwialnego. Możemy więc przyjąć, że dokładnie w chwili rozpoczęcia się ruchu ziarna jest spełniony warunek:

$$\tau_{gr} = \tau_o \quad (1)$$

Naprężenie graniczne jest wielkością fizyczną, jednak bezpośredni pomiar tej wielkości jest praktycznie niemożliwy, zwłaszcza w korytach z dnem rozmywalnym. Dlatego też naprężenia graniczne wyznacza się z równania (1), na podstawie określanych doświadczalnie wartości τ_o , zależnych od parametrów przepływu, przy których rozpoczyna się ruch ziaren.

W 1936 roku Shields jako pierwszy określił eksperymentalnie warunki graniczne, które w formie bezwymiarowej można zapisać następująco [Yalin 1977]:

$$\theta_{gr} = f(\text{Re}_*) \quad (2)$$

gdzie:

- θ_{gr} – bezwymiarowe naprężenie graniczne, nazywane parametrem (liczbą) ruchliwości Shieldsa,
- Re_* – liczba Reynoldsa dla ziaren.

Parametry θ_{gr} i Re_* opisane są następującymi zależnościami:

$$\theta_{gr} = \frac{\tau_{gr}}{dg(\rho_y - \rho_w)} = \frac{\tau_{gr}}{d\rho_w g \left(\frac{\rho_y}{\rho_w} - 1 \right)} = \frac{\tau_{gr}}{d\rho_w g(s-1)} = \frac{v_*^2}{dg(s-1)} \quad (3)$$

$$\text{Re}_* = \frac{d}{\nu} \sqrt{\frac{\tau_{gr}}{\rho_w}} = \frac{dv_*}{\nu} \quad (4)$$

gdzie:

- d – średnica ziarna, m,
- g – przyspieszenie ziemskie, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$,
- ρ_r – gęstość właściwa materiału dennego, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$,
- ρ_w – gęstość właściwa wody, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$,

$$s = \frac{\rho_y}{\rho_w} \quad \text{– względna gęstość właściwa rumowiska,}$$

$$v_* = \sqrt{\frac{\tau_{gr}}{\rho_w}} \quad \text{– prędkość dynamiczna, } \text{m} \cdot \text{s}^{-1},$$

$$\nu \quad \text{– współczynnik lepkości kinematycznej cieczy, } \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}.$$

Shields określił przebieg zależności (2) na podstawie badań wykonanych z użyciem jednorodnych ziaren o kształtach kulistych i średnicach $d = 1,06 \div 2,46$ mm, wykonanych z bursztynu, lignitu, granitu i barytu, a więc z materiałów których gęstość właściwa jest inna niż w przypadku materiału aluwialnego występującego w naturze. Późniejsze badania przeprowadzone przez wielu badaczy [Graf 1971, Yalin 1977, Dąbkowski 1989, Bartnik 1992, Dittrich 1998, Pilotti i Menduni 2001] wykazały, że zależność (2) określona przez Shieldsa w przypadku naturalnego materiału dennego często odbiega od zależności uzyskiwanych w pomiarach. Autorzy wspomnianych badań stwierdzili bowiem, że istotny wpływ na warunki początku ruchu ziaren materiału aluwialnego oraz przebieg zależności (2) ma niejednorodność (wielofrakcyjność) uziarnienia materiału korytowego oraz kształt ziaren, zwykle odbiegający od kulistego.

Niejednorodność uziarnienia materiału korytowego zwykle określa się na podstawie geometrycznego odchylenia standardowego krzywej przesiewu:

$$\sigma_g = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}} \quad (5)$$

gdzie:

- d_{84} i d_{16} – średnice zastępcze ziaren, które wraz z mniejszymi stanowią odpowiednio 84 % i 16% wagi próbki gruntu.

Przyjmuje się, że materiał korytowy jest niejednorodny, gdy $\sigma_g > 1,3$ [Little i Mayer 1976].

W laboratorium hydraulicznym Katedry Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska SGGW wykonano badania wpływu nierównomierności uziarnienia piasków rzecznych

Tabela 1. Charakterystyka piasków rzecznych wykorzystanych w badaniach [Popek i Marisch 2004]

Table 1. Characteristics of river sands used in experiments [Popek i Marisch 2004]

Parametr Parameter	Piasek rzeczny River sand			
	C	D	E	F
d_{50} , mm	0,38	0,41	1,20	1,70
d_{90} , mm	0,70	0,61	1,45	2,10
σ_g	1,53	1,48	1,17	1,18
k_s	$2,92 d_{50}$	$2,58 d_{50}$	$0,94 d_{50}$	$1,24 d_{50}$

dla zakresu $6 < Re_* < 50$ następującą zależność korelacyjną (współczynnik determinacji $R^2 = 0,851$) [Popek 2006]:

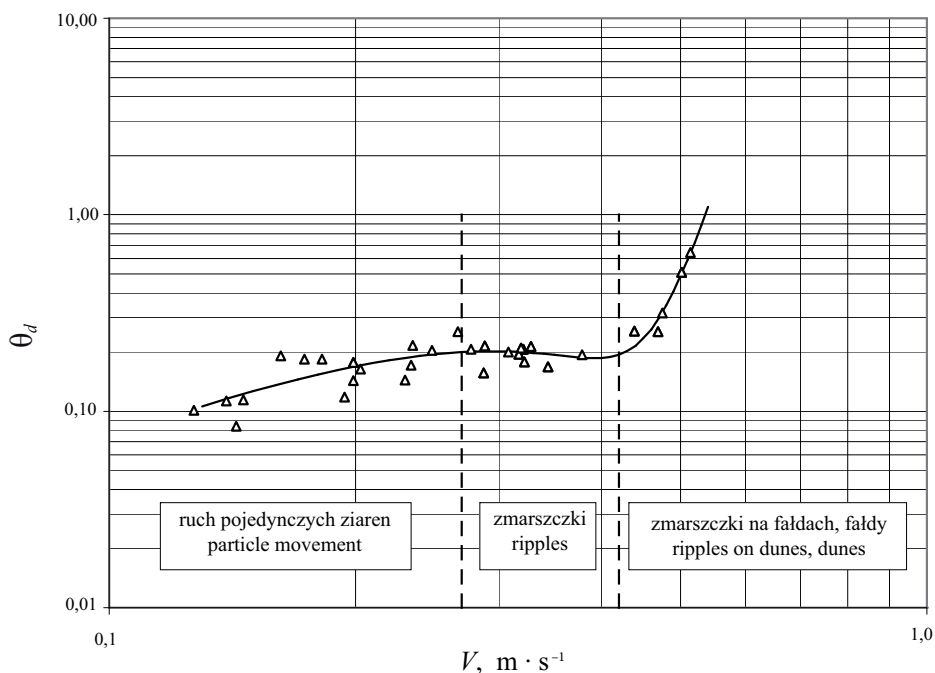
$$\theta_{gr} = 0,116 - \frac{0,270}{Re_*^{0,5}} + \frac{0,243}{Re_*} + \frac{0,0438}{Re_*^2} \quad (6)$$

FORMY DENNE

Dno piaszczyste w korytach rzecznych zawsze jest mniej lub bardziej nieregularnie ukształtowane – faza dna płaskiego przy braku ruchu rumowiska wlezonego praktycznie nie występuje. Jeżeli wleczenie odbywa się w postaci ruchu pojedynczych ziaren, to na dnie pozostają nieruchome formy, które powstały we wcześniejszym okresie, gdy warunki przepływu były odpowiednie do ich uformowania i przemieszczania się w dół rzeki.

Jak wspomniano we wstępie, formy denne mają w przekroju podłużnym kształt wydłużonego trójkąta, przy czym różnią się między sobą wymiarami. Według Van Rijna [1993] wysokość zmarszczek wynosi $(50 \div 100) d_{50}$, a ich długość $(500 \div 1000) d_{50}$. Natomiast wysokość fałdy może maksymalnie osiągać $1/6$ głębokości wody h , a długość $(0,5 \div 1,0) h$.

Wymiary form dennych podane przez Van Rijna znajdują potwierdzenie w obserwacjach prowadzonych w trakcie badań ruchu rumowiska wlezonego w korycie rzeki Zagożdżonki. Na podstawie pomiarów terenowych określono również zakresy prędkości, przy jakich rozpoczynał się ruch zmarszczek, a następnie powstawanie fałd z przemieszczającymi się po nich zmarszczkami. Na rys. 2 przedstawiono wykres zmienności bezwymiarowego naprężenia stycznego na dnie θ_d w zależności od średniej prędkości przepływu V w przekroju poprzecznym rzeki. Przy prędkościach przepływu $V < 0,27 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ obserwowano ruch pojedynczych ziaren piasku po dnie i stopniowe formowanie zmarszczek, które pozostawały nieruchome. Na tym obszarze następował niewielki wzrost naprężeń stycznych na dnie wywołany wzrostem oporów przepływu, a związanych z tworzeniem się zmarszczek. W zakresie prędkości $V = 0,27 \div 0,42 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ opory przepływu praktycznie się nie zmieniały, ponieważ powierzchnia dna ulegała pewnemu „wygładzeniu”, pomimo że obserwowano wyraźne przemieszczanie się zmarszczek. Po przekroczeniu prędkości



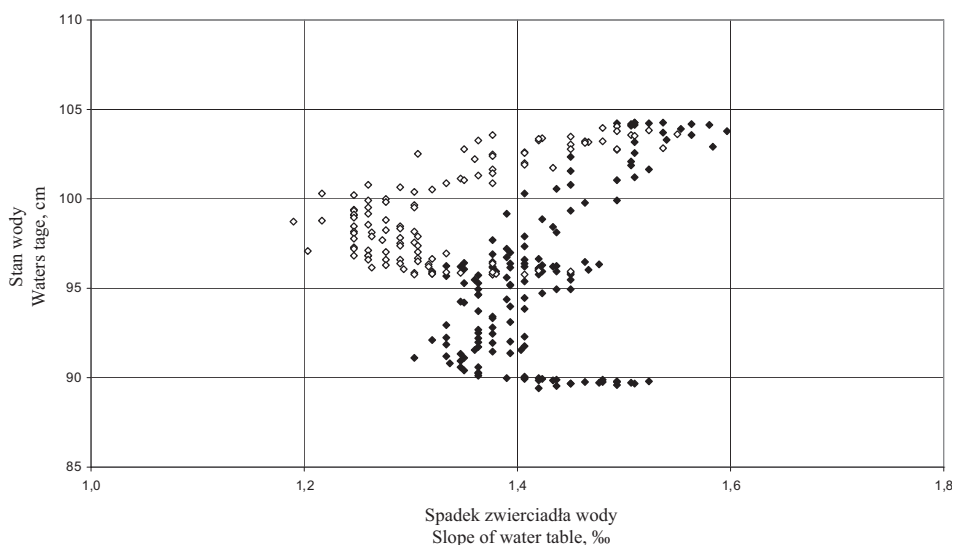
Rys. 2. Zależność między średnią prędkością przepływu w przekroju poprzecznym (V) a bezwymiarowym naprężeniem stycznym na dnie (θ_d) w korycie rzeki Zagożdżonki w poszczególnych zakresach form ruchu rumowiska wlezonego [Poppek 2006]

Fig. 2. Relation between mean flow velocity in cross-section (V) and dimensionless bottom shear stress (θ_d) in the Zagożdżonka riverbed in each ranges of bedload movement form [Poppek 2006]

$V = 0,42 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ gwałtownie wzrastały opory przepływu na dnie i zaczynały tworzyć się fałdy po których w dalszym ciągu poruszały się zmarszczki.

ZMIENNOŚĆ NATĘŻENIA WLECZENIA

Mechanizm transportu piaszczystego rumowiska wlezonego w postaci form dennych wpływa na dużą zmienność natężenia wleczenia nawet wtedy, gdy warunki przepływu wody możemy uznać za ustalone w określonym przedziale czasu. W okresie wezbrań parametry przepływu ulegają szybkim zmianom, przy czym charakterystyki tych zmian są odmienne w fazie przyboru i w fazie opadania fali, co wpływa również na zróżnicowane natężenie wleczenia w poszczególnych fazach wezbrania. Rys. 3 przedstawia wykres zmienności spadku zwierciadła wody w czasie wezbrania, z którego wynika, że w fazie przyboru fali spadki są większe niż w fazie jej opadania, a ponadto przed osiągnięciem kulminacji fali ulegają wyraźnemu zmniejszeniu. Warto również podkreślić, że zmienność spadku zwierciadła wody w obu fazach wezbrania jest do pewnego stopnia histerezą w formie litery „C”. Ma to związek z opóźnieniem i reakcją

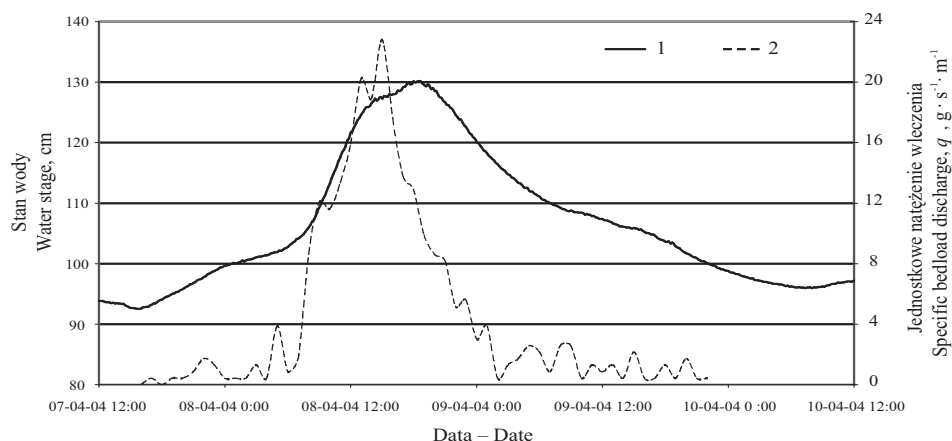


Rys. 3. Zmienność spadku zwierciadła wody w czasie wezbrania: ◆ – faza przyboru stanów wody, ◇ – faza opadania stanów wody

Fig. 3. Variability of water slope during flood flow event: ◆ – rising phase of water stages, ◇ – recession phase of water stages

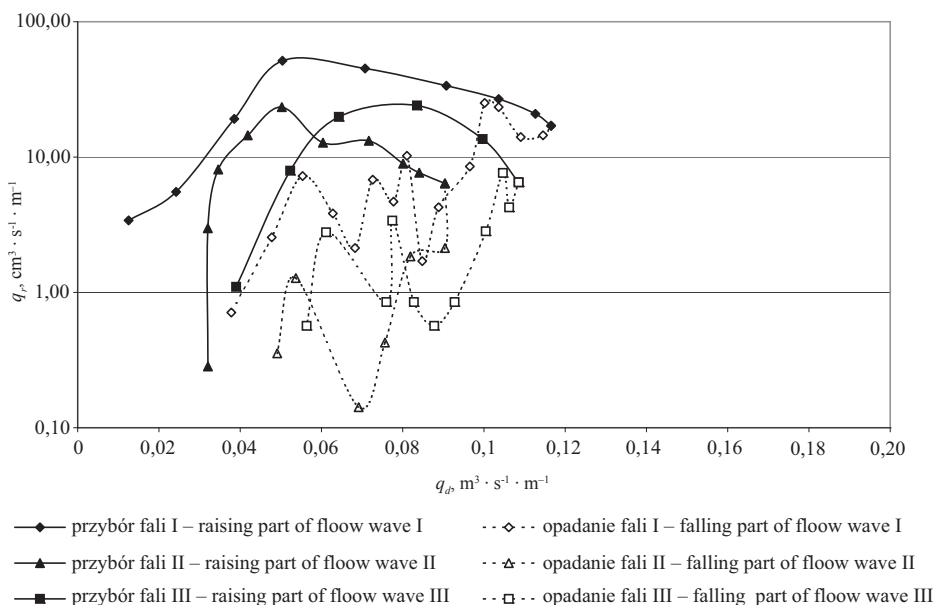
na zmiany oporów przepływu. Na początku wezbrania spadek zmniejsza się, ponieważ opory przepływu maleją – nie tylko w wyniku wspomnianego wcześniej wygładzania się dna, ale również na skutek zmniejszania się szorstkości brzegów spowodowanego przygniataaniem traw przez płynącą wodę. Następnie spadek zwierciadła wody zwiększa się, ponieważ wzrastają opory przepływu w wyniku powstawania fałd na dnie oraz wzrostu oddziaływania brzegów, co stanowi rezultat stosunkowej małej szerokości koryta rzeki Zagożdżonki.

Analogicznie do zmian spadku zwierciadła wody w trakcie wezbrania zmienia się również oddziaływanie strumienia na dno koryta – naprężenia styczne na dnie w fazie przyboru fali są większe niż w fazie jej opadania, co powoduje wyraźne zróżnicowanie intensywności wleczenia (rys. 4). Wykresy zależności między wielkościami jednostkowych natężeń wleczenia q_r i odnoszącego do strefy dna przepływu jednostkowego q_d , które pokazano na rys. 5 i 6, charakteryzują odpowiednio przebieg tego zjawiska. Niezależnie, czy obserwowane fale miały charakter narastających szybko (rys. 5), czy wolno (rys. 6), w obu przypadkach występuje prawostronna histereza w zależności $q_r - q_d$. W rezultacie natężenie wleczenia q_r w fazie przyboru fali może być nawet ponad 10-ciokrotnie większe niż w fazie jej opadania przy tym samym natężeniu przepływu q_d . Ponadto maksymalne natężenie wleczenia występuje wcześniej niż maksymalne natężenie przepływu. Oznacza to, że kulminacja fali wleczenia pojawia się wcześniej niż kulminacja fali przepływu – jest to również widoczne na wykresie na rys. 4.



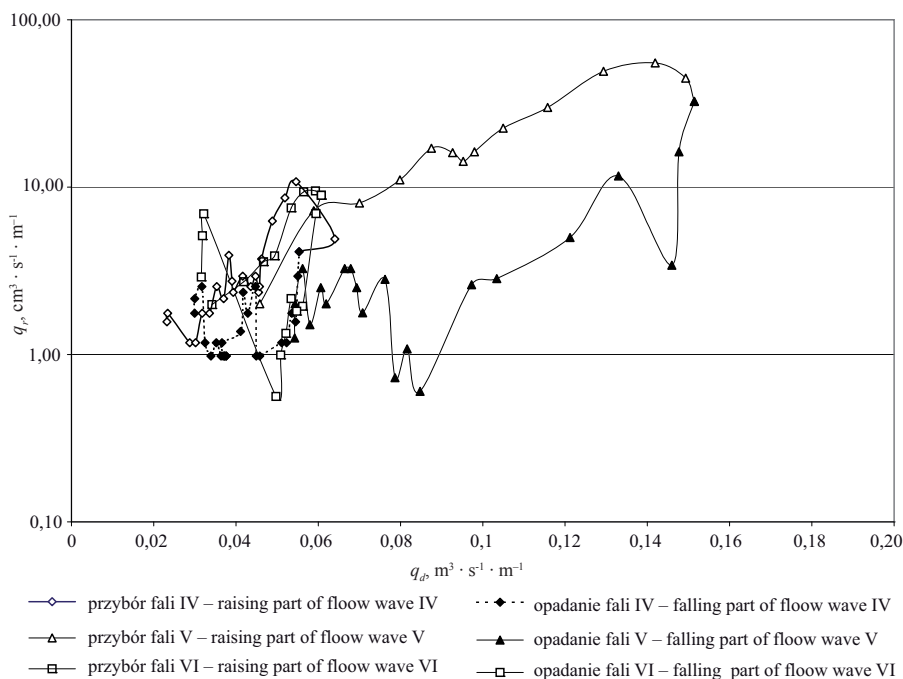
Rys. 4. Hydrogram stanów wody (1) i jednostkowego natężenia wleczenia (2) w czasie wezbrania [Popek 2008]

Fig. 4. Hydrograph of water stages (1) and specific bedload discharge (2) during flood flow event [Popek 2008]



Rys. 5. Zależność między jednostkowym natężeniem przepływu w strefie dna (q_d) a jednostkowym natężeniem wleczenia (q_p) w czasie szybko narastających fal wezbraniowych – czas przyboru fali przepływu od 1 do 2,5 godz. [Popek 2006]

Fig. 5. Relation between specific water discharge in bottom zone (q_d) and specific bedload discharge (q_p) during fast rising flood events – rising time of flow waves from 1 to 2,5 h [Popek 2006]



Rys. 6. Zależność między jednostkowym natężeniem przepływu w strefie dna (q_d) a jednostkowym natężeniem wleczenia (q_r) w czasie wolno narastających fal wezbraniowych – czas przyboru fali przepływu od 9 do 19 godz. [Poppek 2006].

Fig. 6. Relation between specific water discharge in bottom zone (q_d) and specific bedload discharge (q_r) during fast rising flood events – rising time of flow waves from 9 to 19 h [Poppek 2006]

PODSUMOWANIE

Podstawowe znaczenie w opisie warunków ruchu piaszczystego rumowiska wleczonego mają badania empiryczne – a to ze względu na brak teoretycznego opisu zjawiska ruchu dwufazowego (przepływ cieczy wraz z materiałem stałym). W pracy ograniczono się do omówienia najważniejszych czynników, które należy brać pod uwagę przy określaniu intensywności wleczenia zarówno w badaniach tego zagadnienia, jak i w praktyce inżynierskiej.

Podstawowe znaczenie ma określenie warunków granicznych, przy których rozpoczyna się ruch rumowiska wleczonego. Powinno ono być poprzedzone dobrym rozpoznanie uziarnienia materiału korytowego. Badania laboratoryjne wykazały, że istotne znaczenie ma niejednorodność uziarnienia, charakteryzowana przez odchylenie standardowe krzywej przesiewu σ_g wyrażone wzorem (5). Dla piasku pobranego z koryta rzeki Zagożdżonki (średnica $d_{50} \approx 0,4$ mm, $\sigma_g \approx 1,5$) warunki graniczne określa zależność (6), ważna w przedziale $6 < Re_s < 50$.

Na podstawie badań terenowych wykonanych w naturalnym korycie rzeki Zagożdżonki stwierdzono, że ruch pojedynczych ziaren piasku występuje przy średniej prędkości wody w przekroju poprzecznym koryta $V < 0,27 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Przy większych prędkościach transport rumowiska wlezonego odbywa się w postaci ruchu form dennych. W zakresie $V = 0,27 \div 0,42 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ są to zmarszczki, przy $V > 0,42 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ – zmarszczki na fałdach i fałdy.

Natężenia wleczenia charakteryzuje się dużą zmiennością nawet wtedy, gdy warunki przepływu wody możemy uznać za ustalone w określonym przedziale czasu. W okresie wezbrań parametry przepływu ulegają szybkim zmianom, przy czym charakterystyki tych zmian są odmienne w fazach przyboru i opadania fali. Zasadniczy czynnik różniący stanowią tu zmienne opory przepływu, które ujawniają się poprzez obserwowaną w czasie wezbrania zmienność spadku zwierciadła wody. Spadek ten w fazie przyboru fali jest większy niż w fazie jej opadania. Ponadto maksymalna wartość spadku zwierciadła wody występuje przed kulminacją fali przepływu. To powoduje odpowiednie zróżnicowanie intensywności wleczenia i powstawanie prawostronnej histerezy na wykresie zależności pomiędzy natężeniem wleczenia a natężeniem przepływu.

PIŚMIENNICTWO

- Bartnik W., 1992. Hydraulika potoków i rzek górskich z dnem ruchomym. Początek ruchu rumowiska wlezonego. Zesz. Nauk. AR Krak., Rozpr. Habil. 171.
- Dąbkowski S.L., 1989. Analiza oporów ruchu wody i kształtowania się średnich głębokości strumieni w korytach rzek o dnie piaszczystym. Rozpr. Nauk. Monogr. SGGW 97, Wyd. SGGW Warszawa.
- Dittrich A., 1998. Wechselwirkung Morphologie/strömung naturnaher Fließgewässer. Mitteilungen des Institutes für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe (TH) 198.
- Graf W.H., 1971. Hydraulics of sediment transport. McGraw Hill New York.
- Little W.C., Mayer P.G., 1976. Stability of channel beds by armoring. J. Hydraul. Divis. 102, 11, 1647–1661.
- Pilotti M., Menduni G., 2001. Beginning of sediment transport of incoherent grains in shallow shear flows. J. Hydraul. Res. 39, 2, 115–124.
- Popek Z., Marisch K., 2004. Naprężenia graniczne w korycie otwartym z płaskim dnem piaszczystym. Acta Sci. Pol., Architectura 3(1), 37–53.
- Popek Z., 2006. Warunki ruchu rumowiska wlezonego w małej rzece nizinnej. Rozpr. Nauk. Monogr. SGGW 300. Wyd. SGGW Warszawa.
- Popek Z., 2008. Zmienność natężenia ruchu rumowiska wlezonego w czasie wezbrania w małej rzece nizinnej. Przegl. Nauk. Inżynieria i Kształtowanie Środowiska 17, 2(40), 78–86.
- Van Rijn L.C., 1993. Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. Aqua Publications Amsterdam.
- Yalin M.S., 1977. Mechanics of sediment transport. Pergamon Press Oxford.

CHARACTERISTIC OF SANDY BEDLOAD IN THE SMALL LOWLAND RIVER

Abstract. In the paper are presented the most important results of laboratory and field investigations concerning of sandy bedload characteristics in aspects of initiation of motion and variability of bedload discharge in small lowland river, i.e. in steady and unsteady