

## **TRANSPORT RUMOWISKA W RZEKACH. CZĘŚĆ I: POCZĄTEK RUCHU, GRANICZNE NAPRĘŻENIA STYCZNE**

### **THE BED LOAD TRANSPORT IN RIVERS. PART I: START MOVING, SHEAR STRESS**

Mateusz Hämmerling, Paweł Zawadzki, Natalia Walczak,  
Michał Wierzbicki

Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono zagadnienia związane z ruchem rumowiska w rzekach, a szczególnie rumowiska wlezonego. Z uwagi na przeglądowy charakter i szeroki obszar poruszanych zagadnień artykuł podzielony został na dwie części. W części pierwszej przedstawiamy charakterystykę rumowiska i jego podział. Omawiamy również początek ruchu ziarna z uwagi na naprężenia przydenne i kryterium Shieldsa z uwzględnieniem ziaren o różnym kształcie i z różną ekspozycją na działanie siły poruszającej. Zwrócono uwagę na niejednoznaczność krzywej Shieldsa związaną m.in. z różnymi sposobami ruchu ziarna, ekspozycją, a także losowym charakterze przepływu. Dzięki takiemu podejściu zwiększono obszar stosowania tej krzywej. W pracy określono zakres naprężeń stanowiących granicę między ruchem a spoczynkiem, związanych ze zjawiskiem klinowania się drobnych ziaren między grubszymi frakcjami. Alternatywą do krzywych Shieldsa są krzywe obejmujące znaczny zakres liczby Reynoldsa ( $0,01 \div 10\ 000$ ) i uwzględniające różne sposoby poruszania się ziaren, w tym saltację, toczenia się i poruszanie.

**Abstract.** In this paper aspects of bed load movement in rivers are presented. Because of its overview character and wide matter raised, the paper is divided into two parts. In the first part the bed load characteristic and division are presented. The beginning of the grain movement in aspects of shear stress, the Shield's criteria with different grain shape and diversified grains exhibition to moving force are presented. Authors give attention to the Shield's curve ambiguous connected with different grain movement, grain expose to moving force. Because of this approach the range of the Shield's curve apply is

---

Adres do korespondencji – Corresponding authors: dr inż. Mateusz Hämmerling, dr inż. Paweł Zawadzki, dr inż. Natalia Walczak, dr inż. Michał Wierzbicki, Katedra Inżynierii Wodnej i Sanitarnej, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, ul. Piątkowska 94A, 60-649 Poznań; e-mail: [mhammer@up.poznan.pl](mailto:mhammer@up.poznan.pl), [pzaw@up.poznan.pl](mailto:pzaw@up.poznan.pl), [natwal@wp.pl](mailto:natwal@wp.pl), [mwierzb@up.poznan.pl](mailto:mwierzb@up.poznan.pl).

larger. In this paper the ranges of stress as the limit of grain stability/movement taking into consideration of blocking small grains are presented.

**Słowa kluczowe:** początek ruchu rumowiska wlezonego, graniczne naprężenie styczne

**Key words:** beginning of bed load transport, critical shear stress

## WSTĘP

Rzeki należą do najważniejszych czynników formujących powierzchnię Ziemi. Płynąca woda powoli, lecz stale powoduje rozmycie dna koryta i transportuje materiał ze swym biegiem. Geometria koryta ulega ciągłym zmianom. Jeżeli zostaną naruszone warunki równowagi dynamicznej, rzeka wciną się w teren [Radecki-Pawlik 2006]. Wody spływające po powierzchni zlewni niosą ze sobą masy rumowiska organicznego i mineralnego. Rumowisko mineralne stanowią frakcje pyłu, łu, piasku, niekiedy żwiru i kamieni, a organiczne to frakcje stałe i koloidy. Rumowisko dostaje się do rzek w wyniku denudacji [Bednarczyk i Duszyński 2008], czyli procesu stopniowego obniżania się powierzchni Ziemi w wyniku wietrzenia, erozji (eolicznej i wodnej) oraz ruchów masowych. W wyniku tych procesów transportowany materiał przemieszczany jest z terenów górzystych i wyżynnych na nizinne i dalej do rzek i mórz.

W literaturze można znaleźć zarówno proste, jak i bardziej złożone podziały transportu rumowiska w rzekach. Według najprostszej klasyfikacji [Bednarczyk i Duszyński 2008, Parzonka i in. 1998] rumowisko dzieli się ze względu na sposób transportu na wlezione, unoszone i zawieszane. Z kolei Baścik i in. [2006] dzielą rumowisko na: toczyny, wleczyny, zawiesiny, a Przedwojski [1998] i Zawadzki [2013] wyróżniają rumowisko unoszone i wlezione (denne), zawieszane i rozpuszczone. Klugiewicz [1999], Bajkiewicz-Grabowska i Mikulski [2007] dzielą rumowisko na: toczyny, wleczyny, unosiny, zawiesiny, roztwory. Toczyny stanowią rumosz skalny, czyli glazy i duże odłamki skał przetażane po dnie lub tylko przesuwane podczas wielkich wezbrań. Rumowisko wlezione, czyli takie, które w czasie ruchu nie traci kontaktu z dnem, tworzą: otoczaki, żwiry, piaski. Unosiny stanowią rumowisko transportowane w masie wody. Zaliczamy do nich najdrobniejszą frakcję mineralną i te cząstki organiczne, których ciężar właściwy jest większy od ciężaru wody. Zawiesiny są materiałem pochodzenia organicznego, którego ciężar właściwy jest mniejszy od ciężaru właściwego wody, co powoduje, że cząstki te przemieszczają się w dół rzeki na powierzchni wody. Roztwory stanowią związki chemiczne wylugowane ze skał przez wodę [Bajkiewicz-Grabowska i Mikulski 2007].

Rumowisko w ciekach jest transportowane w sposób ciągły lub okresowy, wzdłuż całej długości lub na pewnych odcinkach aż do ujścia. Erozja koryta rzeki polega na rozmywaniu jej dna i brzegów wskutek działania płynącej wody. Bajkiewicz-Grabowska i Mikulski [2007] oraz Bednarczyk i Duszyński [2008] rozróżniają dwa rodzaje erozji wywołanej przez płynącą wodę: erozję denną (wglębną) i erozję boczną. Erozja denna jest to złożenie dna rzeki przez płynącą wodę i niesiony przez nią materiał. Erozja boczna występuje na zakolach rzecznych. Polega na podmywaniu brzegu wklęsłego i pogłębieniu w tym miejscu dna. Dzieje się to na skutek działania siły odśrodkowej i siły Coriolisa. Należy wspomnieć jeszcze o erozji wstecznej, którą obserwujemy w wyniku postępującej w górę rzeki erozji wglębnej dna koryta.

## CHARAKTERYSTYKA RUMOWISKA WLECZONEGO

Rumowisko wleczone jest mieszaniną ziaren o różnej wielkości, gęstości i kształcie. Liczebność poszczególnych frakcji rumowiska i ich wzajemne proporcje, zmieniają się nie tylko w profilu podłużnym, ale również w czasie. Zmienność uziarnienia ma charakter zarówno deterministyczny, jak i probabilistyczny. Zróżnicowanie uziarnienia powodowane jest różną budową geologiczną podłoża, zmiennymi w czasie i na długości koryta warunkami hydraulicznymi przepływu wody i transportu rumowiska. Natomiast charakter losowy uziarnienia wynika stąd, że ziarna rumowiska tworzą pewną populację o zróżnicowanej wielkości [Poppek 2006].

W celu określenia wielkości ziaren i rozkładu uziarnienia materiału dennego należy pobrać próbki o naruszonej strukturze, których masa musi być zgodna z normą ISO 4364 [2005]. Powszechnie stosowaną metodą badawczą jest analiza sitowa. Uziarnienie można scharakteryzować za pomocą tzw. średnic charakterystycznych  $d_{p\%}$ , które określają, jaki procent masy całej próby rumowiska stanowi dana frakcja wraz z frakcjami drobniejszymi. Często jako średnicę charakterystyczną przyjmuje się średnicę, która wraz z frakcjami drobniejszymi stanowi 50% masy próby [Dąbkowski i in. 1982, Poppek 2006]. Z hydraulicznego punktu widzenia istotna jest również taka charakterystyka, która uwzględnia zróżnicowane zachowanie się ziaren o różnej średnicy pod wpływem przepływającej wody i wpływ tego zachowania na procesy zachodzące na dnie ciekłu. Dlatego w opisie rumowiska należy uwzględnić wskaźnik różnoziarnistości  $e = d_{95} / d_5$  lub geometryczne odchylenie standardowe średnicy ziaren  $\sigma_g = \sqrt{d_{84,1} / d_{15,9}}$ . Biorąc pod uwagę to, że rozkład prawdopodobieństwa średnic ziaren rumowiska jest zbliżony do rozkładu logarytmiczno-normalnego, stosowanie geometrycznego odchylenia standardowego  $\sigma_g$  do opisu krzywej uziarnienia wydaje się w pełni uzasadnione.

Innym podstawowym parametrem decydującym o właściwościach hydraulicznych ziarna jest jego kształt. Wpływa on na sposób ułożenia rumowiska na dnie, szczególnie zaś na wystawienie ziaren na działanie przepływającej wody, co może decydować o początku ruchu i sposobie poruszania się. Kształt ziarna można opisać, określając jego kulistość i spłaszczenie. Novak [1988, 1990] zaproponował, aby kulistość ziarna opisać współczynnikiem kulistości\*:

$$\Psi_p = \left( \frac{bc}{a^2} \right)^{1/3} \quad (1)$$

natomiast spłaszczenie ziarna współczynnikiem sferyczności:

$$SF = \frac{a + b}{2 \cdot c} \quad (2)$$

Novak wyróżnił następujące kategorie kształtu ziaren:

- 1) ziarna o krawędziach zaokrąglonych: kule, elipsoidy spłaszczone, elipsoidy wydłużone, tarcze (dyski), tarcze wydłużone, pręty zaokrąglone;

---

\* objaśnienia symboli użytych we wzorach znajdują się na końcu artykułu.

2) ziarna o ostrych krawędziach: sześciiany, graniastosłupy, graniastosłupy wydłużone, płyty, płyty wydłużone, pręty graniaste.

Pomiary przeprowadzone przez Bartnika [1997] wykazały, że rumowisko w potokach i rzekach górskich znacznie odbiega od kształtu kulistego. Ziarna kuliste stanowiły jedynie od 5 do 10% całej próbki. Dominującym kształtem – około 75%, były ziarna określane na podstawie współczynnika kształtu jako graniastosłupy, elipsy wydłużone, dyski oraz dyski wydłużone.

Bartnik [2006] twierdzi, że na początek ruchu rumowiska, czyli na wielkość naprężeń granicznych, wpływają: wielkość ziaren, wartość odchylenia standardowego krzywej przesiewu, współczynnik klinowania się ziaren, intensywność i prędkość przepływu oraz kształt ziaren. W tabeli 1 zestawiono kategorie kształtu ziaren wraz z wartościami współczynnika kulistości  $\Psi_p$  (wz.(1)) i współczynnika sferyczności  $SF$ :

$$SF = \frac{c}{\sqrt{a \cdot b}} \quad (3)$$

Tabela 1. Kategorie kształtu ziaren [Bartnik 2006]

Table 1. Grain shape categories [Bartnik 2006]

Kategorie kształtu ziaren Grain shape categories		b/a	c/b	$\Psi_p$ wz. (1)	$SF$ wz. (3)
I	Kule – Spheres	$\geq 0,64$	$\geq 0,63$	0,75÷0,96	$> 0,70$
II	Elipsy – Ellipses	$< 0,33$	$> 0,4$	$> 0,50 < 0,86$	$< 0,70 \geq 0,43$
III	Dyski i pręty Boards and bars	$< 0,64$	$< 0,52$	$< 0,70$	$< 0,43$

## POCZĄTEK RUCHU RUMOWISKA – NAPRĘŻENIA STYCZNE

Ziarno gruntu niespoistego, leżące na dnie cieką utrzymywane jest przez siłę ciężkości pomniejszoną o wypór hydrostatyczny, natomiast poruszane jest przez siłę parcia hydrodynamicznego wywołanego przepływającą wodą. Siła ciężkości zależy od średnicy ziarna, gęstości rumowiska i jest stała w czasie. Siła, z jaką woda działa na ziarno, zależy od przydennej prędkości chwilowej, kształtu i wielkości ziarna oraz jego usytuowania względem najbliższych ziaren. To, czy ziarno pozostanie w spoczynku, czy też zostanie poruszone, zależy od relacji między siłami utrzymującymi i poruszającymi.

Pojęcie siły poruszającej wprowadził Du Boys w 1879 r. Jest to składowa ciężaru w kierunku linii spadku, wzdłuż której płynie woda. Wielkość tej siły przypadającej na  $1 \text{ m}^2$  powierzchni dna (naprężenia styczne) nazywana jest siłą poruszającą potencjalną:

$$\tau = \rho \cdot g \cdot h \cdot i \quad (4)$$

Część pracy tej siły zużywana jest do pokonania oporów ruchu związanych m.in. z tarcieniem cząstek wody i rumowiska, odpajaniem i transportem rumowiska. Największą siłą przypadającą na jednostkę powierzchni dna, niepowodującej jeszcze ruchu rumowiska, nazywa się granicznym (krytycznym) naprężeniem stycznym  $\tau_{gr}$  [Dąbkowski i in. 1982, Bartnik 1997]. Do ustalenia krytycznej siły poruszającej może służyć kryterium Shieldsa [1936]. Oryginalną zależność między bezwymiarowymi naprężeniami granicznymi:

$$f = \frac{\tau_{gr}}{(\rho_r - \rho) \cdot g \cdot d} \quad (5)$$

i wartościami stosunku średnicy ziarna do grubości laminarnej warstwy przyściennej  $d/\delta$  Shields opracował na podstawie wyników doświadczeń laboratoryjnych z kulistymi, jednorodnymi ziarnami. Badania te wykazały, że wartość naprężenia granicznego zależy od warunków ruchu wody w warstwie przydennej, które charakteryzuje liczbą Reynoldsa dla ziarna  $Re_*$ :

$$Re_* = \frac{u_* \cdot d}{\nu} \quad (6)$$

Wyniki swoich badań Shields przedstawił w postaci zależności parametrów  $f_{gr} = f(Re_*)$  (krzywa Shieldsa). Transport rumowiska może zaczynać się zarówno w ruchu laminarnym, jak i turbulentnym, przy czym graniczne wartości naprężeń stycznych są najmniejsze w ruchu przejściowym. Krzywej Shieldsa nie można opisać jedną zależnością matematyczną, dlatego kilku badaczy opisało krzywą serią formuł ważnych dla wybranych przedziałów liczby Reynoldsa  $Re_*$ . Posługując się tymi wzorami, trzeba jednak pamiętać, że badania Shieldsa były wykonane z użyciem sztucznego rumowiska, tj. ziaren kulistych, wykonanych z materiałów o gęstości względnej w granicach  $1,06 \div 4,25$ .

Badania nad początkiem ruchu w kolejnych latach doprowadziły do znacznych modyfikacji krzywej Shieldsa [Dąbkowski 1992, Buffington i Montgomery 1997]. Rozszerzono zakres stosowania krzywej dla różnych sposobów ruchu ziaren rumowiska wleczonego (saltacja, tocznie się, przesunięcie) i rozmaitej ekspozycji ziarna na siłę hydrodynamiczną [Miedema 2012]. Dość znaczny rozrzut dopuszczalnej siły poruszającej według różnych autorów może wynikać z:

- niejednorodności kształtu i orientacji ziaren,
- zróżnicowanego uziarnienia rumowiska,
- niejednakowych parametrów hydraulicznych przepływu,
- nieobiektywnej oceny początku ruchu rumowiska.

W rzekach spotykamy najczęściej rumowisko o zróżnicowanym uziarnieniu. Dlatego trudno o jedną wartość naprężeń stanowiącą granicę między ruchem a spoczynkiem. Ma na to również wpływ zjawisko klinowania się drobnych ziaren pomiędzy grubszyimi frakcjami. Następuje opóźnienie wprowadzania w ruch drobnych frakcji i łatwiejsze wprowadzenie w ruch ziaren grubszych poruszających się po materiale drobnym o mniejszej szorstkości. Jaeggi [1992] wyróżnił warunki tworzenia się tzw. obrukowania dna.

Tabela 2. Warunki sortowania ziaren i tworzenia się obrukowania dna wg Jaeggiego [1992]  
 Table 2. Conditions of grain sorting and bed armouring by Jaeggi [1992]

Określenie Key word	Zakres naprężeń Range of stress	Opis zjawiska Phenomena description
Słaby transport Weak transport	$f < 0,05$	Drobny materiał dostarczany przez wodę z góry, różniący się od gruntu dna, przenoszony jest ponad dnem Fine sediment supplied from upstream, which is not identical to the bed material, moves over a still bed
Obrukowanie statyczne Static armouring	$0,05 < f < 0,08$	Drobne ziarna są wymywane z powierzchni dna, a grubsze tworzą trwałą warstwę bruku. Brak znacznej erozji, brak zasilania materiałem donoszonym przez wodę z góry Fine particles are eroded from the bed surface and a stable coarse armour layers forms, no substantial erosion
Obrukowanie ruchome Mobile armouring	$0,05 < f < 0,08$	Warunki j. w., ale z góry woda dostarcza materiał podobny do gruntu dna In the same flow conditions as case above, material more or less identical to the bed material is supplied
Obrukowanie dynamiczne Dynamic armouring	$f > 0,10$	Nie powstaje trwałe obrukowanie, lecz największe ziarna mają tendencję do dłuższego pozostawania na dnie od mniejszych A stable armour layer cannot forms, but the coarse particles tend to stay longer in their positions then the fines
Masowy ruch ziaren Full motion	$f \gg 0,10$	Duże natężenie przepływu, które powoduje ruch wszystkich ziaren w mieszaninie; nie oczekuje się zróżnicowanego zachowania ziaren For high flow intensities which are high for all grains of a mixture, no different behavior is to be expected

Bartnik [2006] przedstawił zależność między współczynnikiem kształtu ziaren  $SF$  a naprężeniami bezwymiarowymi  $f$  (parametr Shieldsa) w postaci zależności:

$$f = 0,0123e^{1,6 \cdot SF} \quad (7)$$

Kierując się kategoriami kształtu ziaren, można stwierdzić, że ziarna spłaszczone typu deska, pręt wydłużony, płyta oraz ziarna elipsoidalne będą wcześniej wchodziły w transport, niż by to wynikało z krzywej Shieldsa. Natomiast ziarna o kształcie kulistym  $SF = 0,8 \div 1,0$  otrzymują wartości bezwymiarowych naprężeń, takie jak wynikają z zależności Shieldsa.

Stosowanie kryterium Shieldsa jednocześnie dla wszystkich frakcji gruntu różnoziarnistego, np. poprzez określenie naprężenia granicznego tylko dla przeciętnej średnicy  $d_{50}$  nasuwa szereg wątpliwości. W rozważaniach stateczności różnoziarnistego materiału dna poprawniejsza jest analiza stanu równowagi poszczególnych frakcji i określenie wartości naprężeń  $f_i$  dla wszystkich  $i$  wyróżnionych frakcji gruntu.

Egizarov [1965] na podstawie rozważań teoretycznych, w których przyjął logarytmiczny rozkład prędkości w pionie oraz punkt przyłożenia siły naporu hydrodynamicz-

nego, działającego na pojedyncze ziarno na wysokości  $0,63d$  od podstawy, wyznaczył bezwymiarowe naprężenie graniczne, odpowiadające początkowi ruchu ziaren  $i$ -tej frakcji we wzorze:

$$f_i = \frac{0,1}{\left[ \log_{10} \left( 19 \frac{d_i}{d_m} \right) \right]^2} \quad (8)$$

Uwzględniając chowanie się drobnych ziaren między większymi oraz pozostanie drobnych ziaren w lepkiej podwarstwie burzliwej warstwy przyściennej, do wyznaczenia naprężeń granicznych  $i$ -tej frakcji możemy wykorzystać współczynnik poprawkowy  $\varepsilon$ :

$$f_i = \varepsilon \cdot f \quad (9)$$

Współczynnik ten nazywany jest najczęściej współczynnikiem ukrycia lub współczynnikiem klinowania się ziaren bądź stabilności ziaren [Bartnik 1997]. Współczynnik ukrycia wg Egizarova można zapisać w postaci:

$$\varepsilon_i = \left( \frac{\log_{10} 19}{\log_{10} \left( 19 \frac{d_i}{d_m} \right)} \right)^2 \quad (10)$$

Wielu autorów [Zawadzki 1996, Buffington i Montgomery 1997] współczynnik ukrycia przedstawia w postaci:

$$\varepsilon_i = \left( \frac{d_i}{d_m} \right)^{-m} \quad (11)$$

gdzie wykładnik  $m$  przyjmuje wartości od 0,44 do 1. Na ryc. 1 przedstawiono wartości współczynnika ukrycia wg zależności (11) dla różnych wartości wykładnika  $m$ :

Bartnik i Michalik [2000] przedstawiają równanie opisujące parametr Shieldsa, które zostało zapisane na podstawie pomiarów początku ruchu rumowiska dla górskich odcinków rzek:

$$f_i = 0,033 \left( \frac{d_i}{d_{50}} \right)^{-0,9} \quad (12)$$

W pomiarach początku ruchu rumowiska autorzy wykorzystali metodę radioizotopową, polegającą na mierzeniu i rejestrowaniu promieniowania pochodzącego od ziaren znaczonych, które można przeliczyć na intensywność transportu rumowiska.

Miedema [2012] zaproponował, aby naprężenia potrzebne do poruszenia ziarna przy jego różnej ekspozycji ponad średni poziom dna, odczytywać z opracowanych przez siebie krzywych Shieldsa. Dla każdego z rozpatrywanych położenia ziarna (ryc. 3; ekspozycje

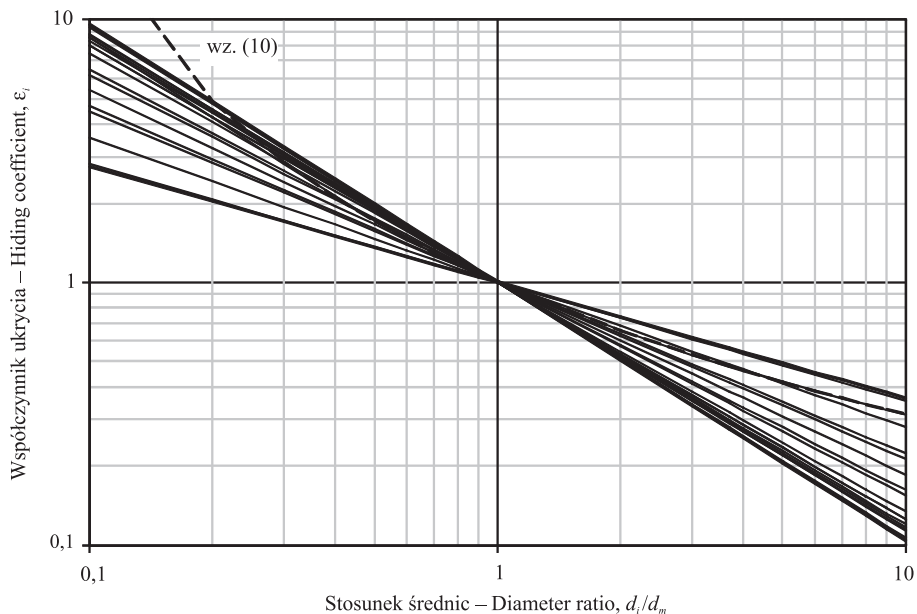
zycja  $E$  od  $0,2 \cdot d$  do  $1,2 \cdot d$ ) i dla różnych sposobów poruszania się ziarna: saltacji, toczenia się i przesunięcia, autor obliczył graniczne naprężenia przy wartościach  $0,01 < Re_* < 10\,000$ . Na wykresie (ryc. 2) dla porównania Miedema przedstawił również wyniki badań innych badaczy oznaczone •.

Zaletą krzywej Shieldsa jest to, że naprężenia nie zależą od gęstości ziarna i właściwości cieczy, niedogodnością zaś to, że obie wartości na wykresie ( $Re_* = u_* \cdot d/v$  oraz  $f = u_*^2 / (\Delta \cdot g \cdot d)$ ) zależą od wartości prędkości dynamicznej. Po przekształceniu zależności (5) można wyznaczyć bezwymiarową, graniczną średnicę ziarna (parametr Bonnefille'a) [Bednarczyk i Duszyński 2008], które nie zostanie wprowadzone w stan ruchu dla zadanego przepływu, tj. dla zadanego naprężenia stycznego względnie dla zadanej prędkości dynamicznej:

$$D_* = d \cdot \left( \frac{\Delta \cdot g}{v^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (13)$$

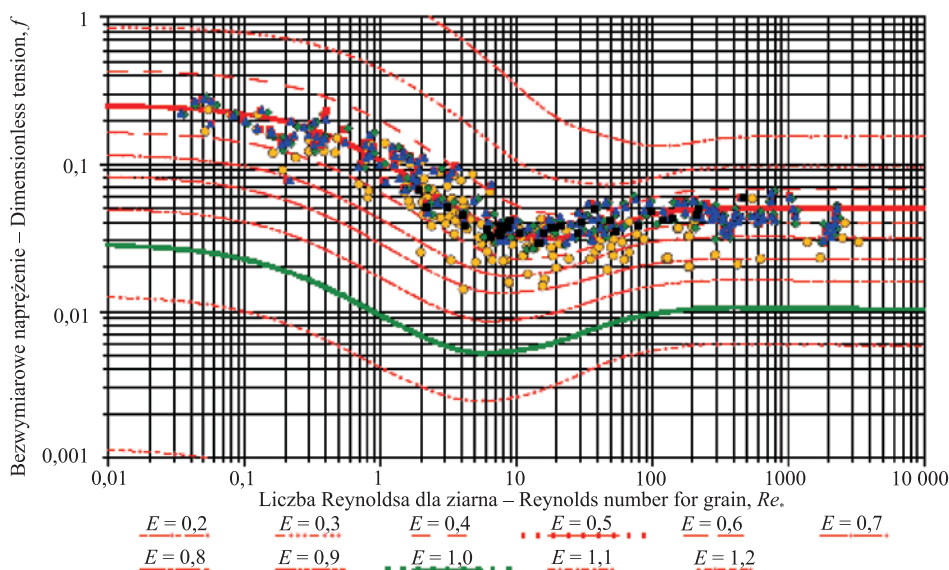
Zależność między bezwymiarowymi naprężeniami Shieldsa  $f$ , liczbą Reynoldsa dla ziarna  $Re_*$  a parametrem Bonnefille'a  $D_*$  można zapisać w następujący sposób:

$$D_* = \left( \frac{Re_*}{\sqrt{f}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad \text{lub} \quad Re_* = \sqrt{f} \cdot D_*^{1,5} \quad (14)$$



Ryc. 1. Zmiany współczynnika ukrycia ziarna w zależności od stosunku średnic  $d_i/d_m$   
Fig. 1. The grain-hiding coefficient changes in grain diameter  $d_i/d_m$  relationship





Ryc. 2. Krzywa Shieldsa dla różnej ekspozycji  $E = x \cdot d$  ziarna i mieszanym sposobie poruszania się (przesunięcie i toczenie) [Miedema 2012]

Fig. 2. The Shield's curve of different grains exposure  $E = x \cdot d$  and different way of movement (sliding and rolling) [Miedema 2012]

Bartnik [1997] przedstawia zależność bezwymiarowych naprężeń granicznych dla  $i$ -tej frakcji jako funkcję parametru Bonnefille'a:  
dla rumowiska drobnego:

$$f_i = 1,025 d_i^{-0,73} \left( \frac{\Delta}{v^2} g \right)^{-0,237} \quad (15)$$

dla rumowiska gruboziarnistego:

$$f_i = 8,205 d_i^{-0,73} \left( \frac{\Delta}{v^2} g \right)^{-0,237} \quad (16)$$

Breusers i Raudkivi [1991] podali zależność między liczbą Reynoldsa  $Re_*$  a parametrem Bonnefille'a  $D_*$  w postaci wzorów:

$$D_* = 2,15 \cdot Re_* \quad \text{dla } Re_* \leq 1 \quad (17a)$$

$$D_* = 2,5 \cdot Re_*^{4/5} \quad \text{dla } 1 < Re_* \leq 10 \quad (17b)$$

$$D_* = 3,8 \cdot Re_*^{5/8} \quad \text{dla } Re_* > 10 \quad (17c)$$

Warto pamiętać, że w podanej przez Meyera-Petera i Mullera zależności na wielkość transportu rumowiska, jako początek ruchu przyjęto graniczne naprężenie równe:

$$\tau_{gr} = 0,047 \cdot (\rho_r - \rho) g \cdot d_m \quad (18)$$

czyli założono stałą wartość bezwymiarowego naprężenia równą 0,047, co jest prawdziwe dla  $Re_* > 100$ . Jak już wcześniej stwierdzono, dla  $Re_* < 100$  parametr Shieldsa przyjmuje zmienne wartości. Dlatego uzasadnione jest wykorzystanie wyrażenia (11) dla poszczególnych frakcji o średnicy  $d_i$ , gdy rumowisko jest różnoziarniste. Gessler [1970, 1971] zaproponował, aby początek ruchu rumowiska opisać z uwzględnieniem jego stochastycznej natury. Przyjął on, że stosunek naprężeń  $\tau/\tau_{gr}$  jest zmienną losową o rozkładzie normalnym, a ziarno pozostanie nieporuszone jeśli  $\tau/\tau_{gr} < 1$ .

## PODSUMOWANIE

W rzekach spotykamy najczęściej rumowisko o zróżnicowanym uziarnieniu. Dlatego trudno o jedną wartość naprężeń stanowiącą granicę między ruchem a spoczynkiem. Ma na to również wpływ zjawisko klinowania się drobnych ziaren pomiędzy grubszymi frakcjami. Stosowanie kryterium Shieldsa jednocześnie dla wszystkich frakcji gruntu różnoziarnistego, np. poprzez określenie naprężenia granicznego tylko dla przeciętnej średnicy  $d_{50}$  nasuwa szereg wątpliwości. Dlatego warto w rozważaniach początku ruchu rumowiska uwzględnić naprężenia potrzebne do poruszenia ziarna przy jego różnej ekspozycji ponad średni poziom dna, odczytywać z opracowanych krzywych Shieldsa dla każdego z rozpatrywanych położenia ziarna (ekspozycja od  $0,2 \cdot d$  do  $1,2 \cdot d$ ) i dla różnych sposobów poruszania się ziarna: saltacji, toczenia się i przesunięcia. W II części artykułu zostaną przedstawione zagadnienia związane z prędkościami granicznymi oraz intensywnością transportu rumowiska wleczonego.

## SPIS OZNACZEŃ

- $a, b, c$  – średnice ziarna mierzone wzdłuż osi współrzędnych układu kartezjańskiego;  
 $a$  jest średnicą największą,  $b$  pośrednią,  $c$  najmniejszą;  
 $d$  – średnica ziarna rumowiska, m;  
 $D_*$  – bezwymiarową, graniczną średnicę ziarna, parametr Bonnefille'a;  
 $d_i$  – średnica  $i$ -tej frakcji ziarna, m;  
 $d_m$  – średnica miarodajna ziarna, m;  
 $f$  – bezwymiarowe naprężenia graniczne, parametr Shieldsa;  
 $f_i$  – bezwymiarowe naprężenia graniczne  $i$ -tej frakcji ziarna;  
 $g$  – przyspieszenie ziemskie,  $m \cdot s^{-2}$ ;  
 $h$  – głębokość strumienia wody, m;  
 $i$  – spadek hydrauliczny;  
 $Re_*$  – liczba Reynoldsa dla ziarna;  
 $SF$  – współczynnik sferyczności;  
 $u_*$  – prędkość dynamiczna,  $m \cdot s^{-1}$ ;

- $\Delta = \rho_r / \rho - 1$  – względna gęstość rumowiska;  
 $\varepsilon_i$  – współczynnik ukrycia ziarna  $i$ -tej frakcji;  
 $\nu$  – kinematyczny współczynnik lepkości wody,  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ;  
 $\rho$  – gęstość wody,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  
 $\rho_r$  – gęstość właściwa rumowiska rzecznoego,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  
 $\tau$  – naprężenia styczne,  $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ ;  
 $\tau_{gr}$  – graniczne naprężenia styczne,  $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ ;  
 $\Psi_p$  – współczynnik kulistości.

## PIŚMIENNICTWO

- Bajkiewicz-Grabowska E., Mikulski Z., 2007. Hydrologia ogólna. Wydawnictwo Naukowe PWN Warszawa.
- Bartnik W., 1997. Hydraulika potoków i rzek górskich z dnem ruchomym. Początek ruchu rumowiska wlezonego. Zesz. Nauk. AR Krak., Rozprawa Habilitacyjna 171, Kraków.
- Bartnik W., 2006. Charakterystyka hydromorfologiczna rzek i potoków górskich. *Infrastr. Ekol. Ter. Wiej.* 4(1), 143–174.
- Bartnik W., Michalik A., 2000. Rozwój badań ruchu rumowiska wlezonego i ich praktyczna weryfikacja. XX Ogólnopolska Szkoła Hydrauliki, Współczesne Problemy Hydrauliki Wód Śródlądowych, Kraków – Ustroń Jaszowice.
- Baścik M., Chelmiecki W., Korska A., Pociask-Karteczka J., Siwek J., 2006. Zlewnia właściwości i procesy. Red. J. Pociask-Karteczka. Wyd. II zmienione. Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego Kraków.
- Bednarczyk S., Duszyński R., 2008. Hydrauliczne i Hydrotechniczne podstawy regulacji i rewitalizacji rzek. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej Gdańsk.
- Breusers H.N.C., Raudkivi A.J., 1991. Scouring. Hydraulic design considerations. Balkema Rotterdam – Brookfield.
- Buffington J.M., Montgomery D.R., 1997. A systematic analysis of eight decades of incipient motion studies, with special reference to gravel-bedded rivers. *Water Resour. Res.* 33(8), pp. 1993–2029.
- Dąbkowski L., Skibiński J., Żbikowski A., 1982. Hydrauliczne podstawy projektów wodnomelioracyjnych. PWRiL Warszawa.
- Egizarov I.V., 1965. Calculation of nonuniform sediment concentrations. *J. Hydr. Divis.* 91, HY4 pp. 225–247.
- Gessler J., 1970. Self-stabilizing tendencies of alluvial channel. *J. Water. Harb. Division, Proc. ASCE* 96, WWS2, pp. 235–249.
- Gessler J., 1971. Critical shear stress of sediment mixtures. XIVth Congress of IAHR, Paris, pp. 1–8.
- Jaeggi M.N.R., 1992. Grain sorting seminar – introduction. Proc. of the International Grain Sorting Seminar, Ascona. Technischen Hochschule Zurich.
- Kługiewicz J., 1999. Hydromechanika i hydrologia inżynierska. Wydawnictwo Projprzem – EKO Bydgoszcz.
- Miedema S.A., 2012. Constructing the Shields Curve PART B: Sensitivity analysis, exposure & protrusion levels, settling velocity, shear stress & friction velocity, erosion flux and laminar main flow. Western Dredging Association. *J. Dredging Engineer.* 12(1), 50–92.
- Novak L., 1988. Stabilita denn bystrinnych toku. Vysoka Skola Zemedelska Praga.
- Novak L., 1990. Urceni stabilniho sklonu denn podhorskych a horskych toku. Sesja naukowa „Współczesne problemy budownictwa wodnego”. Wydawnictwo SGGW Warszawa.

- Parzonka W., Mokwa M., Banasiak R., Jelonek R., Kasperek R., 1998. Metodyka pomiarów transportu rumowiska. Współczesne problemy hydrauliki wód śródlądowych. IBW PAN, XVIII Szkoła Hydrauliki – materiały. Gdańsk.
- PN-ISO 4364:2005. Pomiary przepływu w korytach otwartych. Pobieranie próbek materiału dennego. Polski Komitet Normalizacyjny Warszawa.
- Popek Z., 2006. Warunki ruchu rumowiska wleczonego w małej rzece nizinnej. Rozprawy Naukowe i Monografie. Wydawnictwo SGGW Warszawa.
- Przedwojski B., 1998. Morfologia rzek i prognozowanie procesów rzecznych. Wydawnictwo Akademii Rolniczej Poznań.
- Radecki-Pawlik A., 2006. Wybrane metody obliczania intensywności transportu rumowiska. *Infrastr. Ekol. Ter. Wiej.* 1.
- Zawadzki P., 1996. Warunki równowagi granicznej i transport rumowiska o zróżnicowanym uziarnieniu. *Gosp. Wodna* 7, 196–199.
- Zawadzki P., 2013. Metoda ochrony i odtwarzania pojemności zbiorników przepływowych. *Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus* 12(3), 141–149.

*Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 17.12.2014*