

Fot. 1
 Głazy sztucznie umieszczone
 na rzece Wutach (Niemcy),
 spełniające funkcję
 elementów szorstkości



prof. Jochen Aberle

Jest dyrektorem Zakładu Hydrotechniki i Morfologii Rzecznej w Instytucie Hydrotechniki i Zasobów Wodnych im. L. Leichtweißa (LWI) Politechniki w Brunshwiku (Niemcy) i profesorem w Norweskim Uniwersytecie Naukowo-Technicznym (NTNU) w Trondheim. W działalności badawczej koncentruje się na takich zagadnieniach hydraulicznych, jak konstrukcje hydrauliczne, zależności między roślinnością i wielkością przepływu oraz morfodynamika rzek, a także na metodach eksperymentalnych i oprzyrządowaniu. Opublikował ponad 100 artykułów w czasopiśmie recenzowanych i należy do zespołu redakcyjnego „Journal of Hydraulic Research”.
 jochen.aberle
 @tu-braunschweig.de



JOCHEN ABERLE

SZORSTKOŚĆ CIEKÓW WODNYCH

Hydraulika środowiskowa to poddziedzina mechaniki płynów badająca zagadnienia ruchu wody oraz procesy transportu zachodzące w naturalnych i regulowanych ciekach wodnych. Metody stosowane do oceny oporu przepływu w sztucznych kanałach mogą być także z powodzeniem stosowane w odniesieniu do naturalnych cieków.

prof. Jochen Aberle

Instytut Hydrotechniki i Zasobów Wodnych
im. L. Leichtweißa (LWI) Politechniki w Brunszwicku,
Niemcy

Hydraulika środowiskowa jest dyscypliną, która wyewoluowała z mechaniki płynów i tradycyjnej hydrauliki pod wpływem rosnącej świadomości ekologicznej współczesnych społeczeństw. Jej celem jest wyposażenie hydrologów i specjalistów z dziedzin pokrewnych w wiedzę i metodologię niezbędną do zabezpieczenia zasobów wodnych, w tym zasobów czystej wody dla przyszłych pokoleń. Bada też w różnych skalach ważne zjawiska hydrauliczne i ich interakcje z procesami zachodzącymi w środowisku, m.in. zjawiska fizyczne, chemiczne i biologiczne zachodzące w wodzie płynącej, istotne dla ochrony, odnowy i zarządzania jakością środowiska zgodnie z wymogami takich dokumentów jak ramowa dyrektywa wodna czy Cele Zrównoważonego Rozwoju ONZ.

Szorstkość w naturalnych korytach rzecznych

Jednym z kluczowych wyzwań związanych z przepływem wód jest właściwa ocena jego opóźnienia spowodowanego przez opór na skutek tarcia działającego wzdłuż obwodu zwilżonego (zwilżonych granic łóżyska rzeki) oraz opór, jaki stwarzają obiekty bezpośrednio omywane przez wodę (fot. 1 i 2). Są to główne elementy tzw. oporu przepływu, który powoduje straty energii i generuje korytowe naprężenie styczne, tzn. siłę tarcia o dno i brzegi rzeki, a także prędkość przepływu, charakterystyki turbulencji i poziom wody, a w konsekwencji przepustowość rzeki. Oznacza to z jednej strony, że każdorazowe zwiększenie szorstkości w korycie o zadanej geometrii, nachyleniu i wielkości przepływu powoduje zwiększenie oporu przepływu, czyli w efekcie skutkuje wyższym poziomem wody i wolniejszym przepływem, niż dzieje się to przy mniejszej szorstkości. Z drugiej strony – w korycie o określonej szorstkości, nachyleniu i geometrii przekroju opór ten zależy od wielkości przepływu. W takim przypadku, jeżeli elementy szorstkie w całości znajdują się pod wodą, zwykle maleje on wraz ze wzrostem wielkości przepływu.

Powyższe czynniki należy uwzględnić przy projektowaniu zgodnych z naturą rozwiązań i konstrukcji hydraulicznych mających na celu np. ograniczanie ryzyka powodzi, poprawę stanu ekologicznego cieków wodnych, kontrolowanie transportu rumowiska oraz



JOCHEN ABERLE

rozwój morfologiczny rzek i strumieni. Czynniki te stanowią podstawę badań naukowych i zastosowań praktycznych hydrauliki środowiskowej.

Skale szorstkości

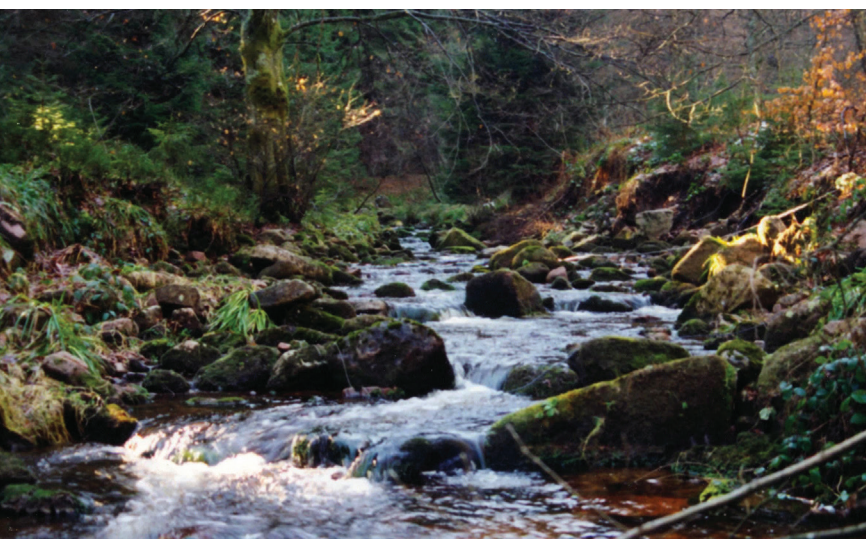
Szorstkość zwykle dzieli się na dwie podkategorie: szorstkość powierzchni dna lub szorstkość ziaren i szorstkość form korytowych (fot. 1 i 2). Straty energii wywołane tym drugim rodzajem szorstkości są związane z wielkoskalowymi elementami szorstkości, takimi jak roślinność nadbrzeżna, słupy konstrukcyjne mostów, cechy morfologiczne rzeki (układy bystrze-płoso) i formy denne (wydmy i zmarszczki) czy nawet pojedyncze głazy (fot. 1-4). W przypadku szorstkości powierzchni straty energii wiążą się zarówno z siłami lepkości na powierzchni dna koryta, jak i oporem powodowanym przez niewielkie elementy szorstkie, takie jak ziarna tworzące koryta aluwialne lub kanały (fot. 5). Można także wprowadzić

Fot. 2
Uregulowany odcinek strumienia Kirchenbach (Niemcy), w którego kanale głównym opór przepływu zależy od szorstkości powierzchni dna

Fot. 3
Przykłady szorstkości wywołanej dużymi formami: pień omywany przez płynącą wodę i związane z tym zjawisko śladu



JOCHEN ABERLE



JOCHEN ABERLE

Fot. 4
System bystrze-płoso
w Schwarzwaldzie, Niemcy

rozróżnienie na przepływ hydraulicznie gładki i przepływ hydraulicznie szorstki oraz reżim przejściowy wykazujący cechy obu tych przepływów. Niewielkie elementy szorstkie nie mają bezpośredniego wpływu na przepływ po hydraulicznie gładkim dnie ze względu na swoje małe rozmiary w porównaniu z powierzchnią podwarstwy lepkiej. Jest to cienka warstwa cieczy, w której występuje ruch laminarny (przepływ w słabo mieszających się lub wcale niemieszających się z sobą warstwach), a prędkość przepływu przy granicy z nieruchomym dnem wynosi zero (brak poślizgu). W miejscach poza podwarstwą lepką przepływ ma charakter turbulentny (z nieregularnym ruchem cieczy). Przepływ hydraulicznie gładki zwykle występuje w tzw. przepływach inżynierskich nad powierzchniami gładkimi (jak np. w stalowych rurach, nad powierzchniami szklanymi lub betonowymi) lub w korytach aluwialnych o dnie składającym się z bardzo drobnych cząsteczek. Z kolei przepływ hydraulicznie szorstki występuje tam, gdzie cząstki wystają z podwarstwy lepkiej wzdłuż ściany koryta. To oznacza, że oddziałują bezpośrednio na ruch wody, a odpowiadające temu straty energii w znacznym stopniu zależą od wielkości, kształtu i ułożenia tych cząstek na powierzchni (fot. 5).

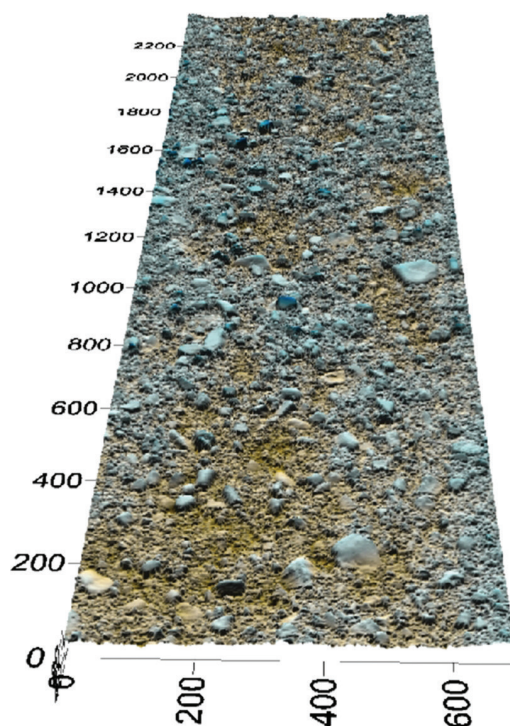
Ilościowe ujęcie szorstkości

Kluczową kwestią w wielu zastosowaniach inżynierii hydraulicznej i hydrauliki środowiskowej jest to, jak właściwie opisać szorstkość danego koryta. Do chwili obecnej prawdopodobnie najczęściej stosowanym współczynnikiem w praktycznej inżynierii hydraulicznej i zastosowaniach hydrauliki środowiskowej był współczynnik Manninga n (lub współczynnik Stricklera k_{St}). Był jednak często krytykowany ze względu na swoje „niefizyczne” wymiary [$s/m^{1/3}$] i empiryczny charakter, o czym świadczy zależność tego współczyn-

Fot. 5
Numeryczny model terenu
zwirowej pokrywy dna
w laboratorium LWI

nika od poziomu wody. W nowoczesnych zastosowaniach numerycznej mechaniki płynów (CFD) jest często wykorzystywany jako parametr w procesie kalibrowania modelu. Oznacza to, że jest on dopasowywany w taki sposób, by reprezentatywne wyniki symulowanych poziomów wody i wielkości przepływu były równe ich zmierzonym odpowiednikom. Do tej pory niewiele metod empirycznych bezpośrednio wiązało wartości współczynnika Manninga z mierzalną charakterystyką fizyczną szorstkości w aluwialnych i sztucznych korytach. Jako przykłady mogą służyć sztywne elementy roślinności wystające ponad zwierciadło wody (np. pnie drzew o znanej średnicy i określonej odległości między nimi) lub koryta aluwialne, dla których przez wyznaczony empirycznie związek można oszacować ten współczynnik na podstawie charakterystycznej średnicy ziaren powierzchni dna. Wartości z wzoru Manninga są powiązane z innymi powszechnie używanymi współczynnikami szorstkości, jak C Chézy’ego czy współczynnikiem oporu f Darcy’ego-Weisbacha.

Powyższy bezwymiarowy współczynnik oporu f jest postrzegany jako bardziej „fizyczny” i z tego względu częściej pojawia się w zastosowaniach naukowych. Może być także łączony z prawem mówiącym, że uśredniona w czasie prędkość ruchu turbulentnego w określonym punkcie jest proporcjonalna do logarytmu odległości tego punktu od ścianki. W przepływie hydraulicznie szorstkim współczynnik szorstkości zastosowany w tym logarytmicznym „prawie ściany” (ang. *law of the wall*) jest odpowiednikiem szorstkości piachu k_s , współczynnika wywodzącego się z pionierskich badań Nikuradsego nad rurami, w których



JOCHEN ABERLE



na dnie umieszczono piasek. To prawo ma niewielkie zastosowanie mimo swojego fizycznego charakteru (tzn. sprawdza się jedynie przy dużych zanurzeniach względnych i do 20 proc. głębokości wody), a k_s to parametr szorstkości hydraulicznej, który może różnić się od parametrów szorstkości wynikających z geometrii koryta stosowanych do opisu pionowego zasięgu elementów szorstkich. Z tego względu często uważa się, że wartość k_s odpowiada iloczynowi wysokości geometrycznej szorstkości pionowej i czynnika stałego – dlatego też wiele praw dotyczących oporu należałoby uznać za półempiryczne.

Digitalizacja otwiera nowe możliwości

Dokładne określenie szorstkości geometrycznej nie zawsze jest proste ze względu na jej losowy charakter w ciekach naturalnych, tzn. niejednorodność przestrzenną koryt rzecznych (fot. 3 i 4). Metody ilościowego określenia szorstkości koryt rzecznych można podzielić na metodę dyskretną i metodę losową. Pierwsza z nich zakłada, że powierzchnia dna składa się z pojedynczych cząstek lub form morfologicznych, a ich szorstkość jest często opisywana jako charakterystyczna wielkość ziarna w warstwie powierzchniowej dna. Taki wyznacznik szorstkości nie uwzględnia struktury powierzchni, która zależy też od innych parametrów, takich jak orientacja, upakowanie, zachodzenie na siebie lub wystawanie (imbrykacja i protruzja) ziaren. Oznacza to, że nawet jeśli znamy pełny rozkład wielkości ziaren w materiale powierzchniowym, jednoznaczne określenie szorstkości powierzchni wciąż nie jest możliwe, gdyż ten sam materiał może ułożyć się w różny sposób.

Z kolei metoda pola losowego umożliwia scharakteryzowanie struktury powierzchniowej. Metoda ta

wykorzystuje najnowsze odkrycia w dziedzinie fotogrametrii bliskiego zasięgu i skaningu laserowego do tworzenia bardzo precyzyjnych numerycznych modeli terenu (DEM), które następnie można poddać szczegółowej analizie z zastosowaniem metod statystycznych. Szorstkość dna lub ściany uznaje się za pole losowe rzędnych powierzchni, co umożliwia określenie skali zarówno dla pionowych, jak i poziomych cech szorstkości, w efekcie dając jej bardziej precyzyjny obraz. Metody te, choć opracowane w ubiegłym stuleciu, nie zostały jeszcze ujęte w formie praw opisujących opór przepływu. O potrzebie takich prac mówi np. działalność badawcza prowadzona obecnie w LWI, która wskazuje, w jaki sposób jednocześnie badanie pozornie niezwiązanych z sobą zjawisk pozwala udoskonalić opis szorstkości w zastosowaniach hydrauliki środowiskowej.

Co łączy tunele hydrotechniczne i sztuczne bystrza?

Na pierwszy rzut oka to pytanie wydaje się nieco dziwne, ponieważ tunele hydrotechniczne nie mają nic wspólnego ze sztucznymi bystrzami (czyli konstrukcjami inżynierskimi do stabilizacji dna rzeki). Jednak z punktu widzenia hydrauliki środowiskowej łączy je istotna cecha: jedno i drugie mają chropowate ściany, a szorstkość odgrywa kluczową rolę przy projektowaniu obu tych konstrukcji.

Tunele hydrotechniczne stanowią istotną część wielu systemów hydroenergetycznych. W dużym stopniu ich przepustowość jest definiowana przez tarcie. Projekt Tunnelroughness, prowadzony przez Norweską Akademię Nauk i Techniki (NTNU), bada straty energii w tunelach hydrotechnicznych znajdujących się w tym kraju, które zazwyczaj, po ich przebiegu lub wysadzeniu, mają chropowate ściany (fot. 6).

Fot. 6
Widok tunelu hydrotechnicznego z chropowatymi ścianami, badanego w ramach projektu Tunnelroughness

Fot. 7

Niestrukturalne sztuczne bystrze zbudowane w celu przywrócenia ekologicznej łączności odcinków rzeki. Zaprojektowanie takich budowli wymaga oceny szorstkości ziarna, a także szorstkości ciał sztywnych



RALPH EIKENBERG

Tunele takie są wykorzystywane zarówno do transportu wody ze zbiorników do siłowni, w których jest wytwarzana energia, jak i do kontrolowanego spuszczenia wody przelewowej ze zbiorników do obszarów położonych poniżej. Tarcie powodowane przez ściany tunelu jest najczęściej obliczane za pomocą wzorów empirycznych, wartości tabelarycznych lub metod fotograficznych. Innymi słowy, jest to raczej przybliżony szacunek, niewynikający z analizy szorstkości rzeczywistych. Projekt Tunnelroughness ma na celu udoskonalenie metod analitycznych, eksperymentalnych i numerycznych wykorzystywanych do oceny strat wynikających z tarcia w wodzie płynącej w skalnych tunelach hydrotechnicznych z chropowatymi ścianami.

Wykorzystując dane ze skaningu laserowego istniejących systemów tuneli do zbudowania modeli komputerowych i modeli skali (fot. 6), z badań laboratoryjnych i numerycznych zebrano bardzo precyzyjne dane o przepływie. Na ich podstawie zostaną obliczone straty energii, które następnie zostaną odniesione do struktury chropowatości ścian tunelu, oszacowanej na podstawie analiz statystycznych danych ze skaningu laserowego. Ostateczne wyniki pozwolą na ocenę strat energii w tunelach z chropowatymi ścianami i z tego względu będą miały dużą wartość dla energetyki wodnej i innych użytkowników końcowych. Właściwości pola przepływu przy ścianach będą badane w dalszym ciągu za pomocą tzw. metody podwójnego uśrednienia (DAM), nowatorskiego ujęcia badania przepływów niejednorodnych przestrzennie w oparciu o podwójnie uśrednione (w czasie i przestrzeni) równania Naviera-Stokesa opisujące ruch cieczy lepkich.

Co ciekawe, te same metody można wykorzystać do opisu przepływów niejednorodnych przestrzennie w szorstkich strumieniach górskich (fot. 4) lub sztucznych bystrzach o zwiększonej szorstkości (fot. 7). Te ostatnie zasługują na szczególną uwagę, jeśli chodzi o przywrócenie ekologicznej łączności między odcinkami rzeki przez umożliwienie przepływu ryb ponad przeszkodami. Utworzenie korytarzy dla migracji ryb nie jest jednak zadaniem łatwym, ponieważ wymaga zaprojektowania trójwymiarowych konstrukcji o określonej geometrii i warunkach hydraulicznych dla różnych gatunków i wielkości ryb. To oznacza, że korytarze migracyjne muszą być pomyślane w sposób gwarantujący odpowiednio wolną prędkość przepływu i głębokość wody. Zarówno prędkość przepływu, jak i głębokość wody zależy od cech szorstkości, które należy właściwie ocenić w trakcie procesu projektowania.

Powyższe dwa przykłady stanowią łącznie praktyczne podsumowanie niniejszego artykułu: wskazują cele dalszych badań dotyczących opisu wpływu złożonej szorstkości na pole przepływu, tzn. na badanie związku między szorstkością hydrauliczną i topografią koryta.

Podziękowania

Autor dziękuje członkowi zespołu LWI, inż. Ralphowi Eikenbergowi, za wkład w badania i udostępnione materiały. Projekt Tunnelroughness jest realizowany w ramach programu EnergiX, finansowanego przez Norweską Radę ds. Badań Naukowych (projekt nr 255318/E20) we współpracy z Norweską Dyrekcją ds. Zasobów Wodnych i Energii, Norweskim Centrum Energetyki Wodnej i partnerami przemysłowymi, BKK i TrønderEnergi. Projekt jest także afiliowany przy HydroCen, ośrodku badawczym prowadzącym badania nad energią przyjazną dla środowiska.

Chcesz wiedzieć
więcej?

Aberle J., Nikora V., *Statistical properties of armored gravel bed surfaces*, „Water Resources Research” 2006, 42, W11414, doi: 10.1029/2005WR004674.

Ferguson R., *ESEX Commentary: Time to abandon the Manning equation?*, „Earth Surface Processes and Landforms” 2010, doi: 10.1002/esp.2091.

Morvan H., Knight D., Wright N., Tang X., Crossley A., *The concept of roughness in fluvial hydraulics and its formulation in 1D, 2D and 3D numerical simulation models*, „Journal of Hydraulic Research” 2008, 46 (2): 191–208.

Nikora V.I., Stoesser T., Cameron S.M., Stewart M., Papadopoulos K., Ouro P., McSherry R., Zampiron A., Marusic I., Falconer R.A., *Friction factor decomposition for rough-wall flows: theoretical background and application to open-channel flows*, „Journal of Fluid Mechanics” 2019, 872: 626–664, doi: 10.1017/jfm.2019.344.