INFRASTRUKTURA I EKOLOGIA TERENÓW WIEJSKICH

Nr 4/2/2006, POLSKA AKADEMIA NAUK, Oddział w Krakowie, s. 151–158
Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi

Małgorzata Robakiewicz

ROLA OSTRÓG W REGULACJI RZEK

Streszczenie

Ostrogi są konstrukcjami budowanymi poprzecznie do kierunku przepływu, które stosowane są przy regulacji rzek nizinnych. Zasadniczym celem ich budowy jest ochrona brzegów oraz zwężenie koryta rzecznego, co prowadzi do zwiększenia głębokości w korycie głównym, a w konsekwencji do przedłużenia okresu nawigacyjnego.

Analizując wpływ ostróg na hydrodynamikę oraz ruch rumowiska w rzece, należy rozważyć na dwa przypadki: (1) ostrogi *niezatopione,* kiedy korona konstrukcji znajduje się ponad zwierciadłem wody oraz (2) ostrogi *zatopione*.

W warunkach ostróg *niezatopionych* obserwuje się zwężenie koryta głównego rzeki, któremu towarzyszy zwiększenie prędkości wody, a w konsekwencji jego pogłębianie. W obszarach między ostrogami ruch wody jest znacznie wolniejszy, co powoduje odkładanie się tam niesionego rumowiska. W przypadku ostróg *zatopionych* ruch wody odbywa się całym korytem rzeki, jednak zwiększenie oporów ruchu w obszarze ostróg powoduje zmniejszenie przepustowości rzek, co może mieć istotne znaczenie w warunkach powodziowych. W każdym z przypadków ruchowi wody towarzyszy mniej lub bardziej intensywny ruch rumowiska. Stan wiedzy w zakresie mechanizmów wzajemnego oddziaływania rzeki z ostrogami jest nadal niewystarczający, by można było prognozować zmiany denne w korycie rzeki z dużą dokładnością. Ostrogi choć budowane od bardzo dawna, nie zawsze doprowadziły do osiągnięcia zamierzonego celu; często przysparzają dodatkowych trudności (np. wymycia, odkładanie rumowiska). W ostatnim okresie można zauważyć powrót do badań laboratoryjnych; rzadziej wykonywane są pomiary terenowe. Badania na modelach hydraulicznych pozwalają lepiej zrozumieć mechanizmy rządzące ruchem wody i rumowiska w warunkach rzeki regulowanej ostrogami. Dostarczają one również danych dla potrzeb weryfikacji modeli matematycznych, które pozwolą na rozwiązywanie problemów występujących w naturze.

Słowa kluczowe: ostrogi, hydrodynamika, ruch rumowiska, regulacja rzek

WSTĘP

Ostrogi są konstrukcjami stosowanymi w regulacji rzek nizinnych w wielu krajach (m.in. Niemcy, Holandia, Włochy, Japonia, USA) od kilku wieków; można je również spotkać na Polskich rzekach (np. Wisła, Odra, Warta). Zasadniczym celem ich budowy jest zwężenie koryta rzeki, by tą drogą zapewnić dostatecznie duże głębokości umożliwiające nawigację przez znaczną część roku. Drugim, nie mniej istotnym powodem budowy ostróg jest ochrona brzegów rzeki, szczególnie w rejonach zakoli.

Ostrogi, tj. konstrukcje usytuowane poprzecznie do brzegów rzeki, projektowane są na ogół na warunki stanów średnich, kiedy to ich korony znajdą się nieznacznie powyżej zwierciadła wody. W warunkach zmiennych stanów wody konstrukcje te pracują w dwóch odmiennych reżimach, jako: (1) *niezatopione*, (2) *zatopione*.

W przypadku ostróg *niezatopionych* ruch wody odbywa się korytem głównym; wymiana wody pomiędzy korytem głównym a obszarem pomiędzy ostrogami jest mała. Znaczny wzrost prędkości wody obserwowany jest w rejonie głowic ostróg. Dodatkowo obserwowane jest tworzenie się wirów, które przemieszczają się od głowic ostróg w dół rzeki. W przypadku dna zbudowanego z materiału drobnoziarnistego wzrostowi prędkości towarzyszy podrywanie rumowiska z dna oraz opadanie w rejonach o mniejszej dynamice. Najbardziej intensywny proces erozji dna obserwuje się na ogół w rejonach głowic oraz w nurcie rzeki. W obszarach pomiędzy ostrogami ruch wody jest znacznie słabszy w stosunku do pozostałej części koryta rzeki, co sprawia, że w tych rejonach odkłada się rumowisko. Obszary pomiędzy ostrogami stają się miejscami bujnego rozwoju roślinności.

Wraz ze wzrostem poziomu wody ostrogi stają się *zatopionymi*, tworząc nowy reżim pracy konstrukcji. Największe prędkości obserwuje się nadal w korycie głównym, natomiast ostrogi stanowiąc przeszkodę, opóźniają przepływ wody w tej części koryta, co może być istotne w okresie powodzi.

Można by sądzić, że wiedza w zakresie ruchu wody oraz rumowiska w rzekach jest na tyle duża, że dalsze badania nie znajdują uzasadnienia. Praktyka inżynierska pokazuje jednak, że ze względu na złożoność procesów występujących w naturze, wiele zrealizowanych inwestycji nie spełniło oczekiwań, tj. nastąpiła przebudowa dna rzeki w sposób niepożądany. Z tego powodu ponownie zainteresowano się badaniami laboratoryjnymi oraz pomiarami *in situ*. Należy również zauważyć duże zainteresowanie modelowaniem matematycznym.

BADANIA NA MODELACH HYDRAULICZNYCH

Znaczna złożoność warunków hydrologicznych i morfodynamicznych w rzekach sprawia, że badania terenowe są trudne do wykonania, a zgromadzone wyniki zwykle niełatwe do jednoznacznej interpretacji. W takich przypadkach chętnie sięga się do badań modelowych, gdzie można stworzyć uproszczone, a jednocześnie kontrolowane, warunki przepływu pozwalające na szczegółową analizę obserwowanych zjawisk. Badania modelowe prowadzone w wielu laboratoriach na świecie obejmowały zarówno przypadki pojedynczej, jak i zespołu ostróg; w większości przypadków badania modelowe prowadzono w warunkach dna stałego, rzadziej z uwzględnieniem ruchu rumowiska.

Wpływem pojedynczej ostrogi nie zatopionej na przepływ w korycie o kształcie prostokątnym i stałym dnie zajmowali się m. in. Rajaratnam i Nwachukwu [1983]. Autorzy analizowali wpływ względnej długości ostrogi (tj. stosunku długości ostrogi do szerokości kanału) i średnich warunków przepływu w kanale, na zmianę rozkładu prędkości wody w płaszczyźnie pionowej oraz naprężeń stycznych przy dnie w sąsiedztwie konstrukcji. Uzyskane wyniki pozwoliły stwierdzić, że budowa pojedynczej ostrogi zaburza przepływ na krótkim odcinku rzeki powyżej ostrogi (ok. 2 długości) oraz na zdecydowanie dłuższym poniżej konstrukcji (ok. 12 długości). Analizując przepływ w kanale w obecności pojedynczej ostrogi, pokazano również, że rozkład prędkości w profilu pionowym jest niemal jednorodny w pobliżu głowicy oraz w rejonie bezpośrednio powyżej ostrogi. Poniżej ostrogi obserwuje się tworzenie strumienia w sąsiedztwie dna. Badania wskazały ponadto na wzrost naprężeń stycznych przy dnie w bezpośrednim sąsiedztwie ostrogi, szczególnie w rejonie głowicy.

Ishii i in. [1983] na podstawie swoich badań laboratoryjnych pokazali, że wpływ warunków przepływu na wielkość obszaru znajdującego się pod wpływem pojedynczej ostrogi jest prawie niezauważalny. Pokazali również, że zasięg oddziaływania ostrogi maleje wraz ze wzrostem jej długości.

Prowadzone były również badania wpływu pojedynczej ostrogi na zmiany denne, korzystając z modelu z dnem ruchomym [Gill 1972]. Gill pokazał, że względna głębokość wymywania rośnie wraz ze wzrostem naprężeń przy dnie, ale tylko do momentu, gdy naprężenia styczne osiągają wielkość krytyczną, charakterystyczną dla materiału dennego; dalszemu wzrostowi naprężeń przy dnie nie towarzyszy dalsze wymywanie rumowiska.

Kompleksowe badania zespołów ostróg prowadzone były w ostatnich latach przez badaczy holenderskich w Laboratorium Mechaniki Płynów Politechniki w Delft. Obejmowały one zarówno testy w przypadku dna stałego, jak i ruchomego oraz w różnych reżimach pracy ostróg. Badania w warunkach dna stałego zostały wykorzystane m.in. do oceny oporów ruchu wywołanych obecnością zespołu ostróg, w zależności od poziomu zatopienia ostróg [Yossef 2004]. Zespół ostróg stanowi przeszkodę powodującą opory ruchu, które można przedstawić jako sumę oporów ruchu związanych z tarciem o dno kanału oraz oporem wywołanym obecnością ostróg. Na podstawie badań laboratoryjnych Yossef [2004] przedstawił nomogramy tzw. efektywnego współczynnika oporu w obszarze ostróg. Pokazują one, że wraz ze wzrostem stopnia blokowania i wzrostem liczby Frouda wpływ ostróg jest coraz bardziej „odczuwalny" przez analizowany system.

Prowadzone były również badania dla przypadku zespołu ostróg w warunkach dna ruchomego. Porównanie zmian dennych w sąsiedztwie ostróg w zależności od reżimu przepływu [Yossef, de Vriend 2004] pokazało, że w każdych warunkach następuje wymywanie w sąsiedztwie głowicy ostrogi. W sytuacji zespołu ostróg niezatopionych ruch wody wraz z rumowiskiem ma charakter cyrkulacji, co prowadzi do odkładania się materiału w obszarze pomiędzy ostrogami powyżej ostrogi. W przypadku ostróg zatopionych woda wraz z rumowiskiem przemieszcza się na całej długości obszaru pomiędzy ostrogami. W badaniach laboratoryjnych analizowano również wpływ różnych sposobów budowy ostróg (pełne, ażurowe) oraz nachylenia stopy na warunki przepływu [Uijtewaal 2005]. Analiza czterech typów ostróg pokazała, że te pracujące jako niezatopione, a zbudowane jako nieprzepuszczalne znacznie wyraźniej redukują prędkości przepływu w stosunku do ostróg przepuszczalnych. Złagodzenie kąta nachylenia stopy ostrogi (z 1:3 do 1:6) w przypadku konstrukcji nieprzepuszczalnej powoduje redukcję tworzących się wirów. Takie rozwiązanie jest również korzystne, gdy ostrogi są zatopione. Wadą takiego rozwiązania jest jednak zwężenie koryta rzeki, istotne w przypadku, gdy koryto rzeki jest wąskie. Ostrogi o konstrukcji ażurowej powodują redukcję naprężeń oraz zmniejszają turbulencję przepływu, co jest ich cechą pozytywną. Ich cechą negatywną jest słaba redukcja prędkości na brzegach kanału.

MODELOWANIE MATEMATYCZNE

Modelowanie matematyczne stanowić może alternatywny sposób oceny wpływu ostróg na hydro- i morfodynamikę wybranego odcinka rzeki. By jednak tak się mogło stać modele matematyczne muszą zapewniać taki poziom dokładności, który pozwoli na rozwiązywanie problemów nie tylko w skali makro, ale również zagadnień o charakterze szczegółowym. Próby stworzenia modeli, które umożliwiałyby prognozowanie zmian warunków przepływu (np. pola prędkości, zmian poziomu zwierciadła wody) oraz ruchu rumowiska (wymywanie, odkładanie), prowadzone są od co najmniej 30 lat. Można wyróżnić dwie zasadnicze grupy modeli: (1) hydrodynamiczne oraz (2) hydrodynamiczne sprzężone z morfo-dynamicznymi. W obu grupach analizować można przypadki upraszczające warunki przepływu do wielkości uśrednionych w pionie (modele 2D) lub uwzględniające zmienność w przepływu przestrzeni (modele 3D). Każdy z wymienionych typów modeli może służyć do rozwiązywania zagadnienia warunków ustalonych oraz nieustalonych w czasie. Modele hydrodynamiczne warunków ustalonych w czasie w przypadku 2D nie prowadzą do odwzorowania charakterystycznego ruchu cyrkulacyjnego w obszarze pomiędzy ostrogami. Próbę zmodyfikowania rozwiązania równań przepływu poprzez modyfikację modelu turbulencji k-ε w taki sposób, by uwzględnić zmiany kształtu linii prądu na skutek obecności ostrogi przedstawili Tingsanchali i Maheswaran [1990]. Taka modyfikacja pozwoliła na uzyskanie dobrych zgodności wyników modelowania z danymi pochodzącymi z badań laboratoryjnych wykonanych przez Rajaratnam i Nwachukwu [1983]. Paquier i in. [2003] porównali wyniki obliczeń modelami hydrodynamicznymi dwuwymiarowymi przeprowadzonymi, korzystając z metody objętości skończonych, stosując siatkę regularną zbudowaną z czworoboków (model Rubar 20, Paquier [1998]) oraz wyników rozwiązania uzyskanego dla siatki nieregularnej zbudowanej z trójkątów (model Shwcin, Audusse i in. [2000]), z wynikami badań laboratoryjnych wykonanych w laboratorium INSA w Lyonie. Obie zaproponowane metody obliczeń wskazały na trudności w dokładnym odwzorowaniu pola prędkości jak również zmian poziomu zwierciadła wody. Również inne prace [Aya i in. 1997] dotyczące zastosowania modeli 2D dla odwzorowania pola prędkości w rzece regulowanej ostrogami prowadziły do podobnych wniosków. Pewną drogą dla poprawy odwzorowania cyrkulacji w rejonie pomiędzy ostrogami może być zastosowanie metody HLES (*Horizontal*

Large Eddy Simulation), która pozwala na rozdzielenie turbulentnego pola prędkości na dwie części, tj. składowe związane z wirami dużej i małej skali. Symulacje wykonane, korzystając z pakietu Delft3D-Flow (licencja wl|Delft Hydraulics) z uwzględnieniem HLES [Robakiewicz 2005], w przypadku zespołu ostróg prowadzą do rezultatów zbliżonych do obserwowanych w naturze.

Rozwój techniczny pozwolił na sięgnięcie do modeli trójwymiarowych. Próbę porównania wyników badań laboratoryjnych z obliczeniami wykonanymi modelem trójwymiarowym warunków hydrodynamicznych rzeki regulowanej ostrogami podjęli Mayerle i in. [1995]. Autorzy pokazali, że odwzorowane warunki przepływu w istotny sposób zależą od przyjętego opisu warunków turbulencji, a uzyskane wyniki znacznie odbiegają od tych uzyskanych w laboratorium. Ouillon i Dartus [1997] przedstawili wyniki obliczeń przepływu wokół ostrogi, rozwiązując równania Reynoldsa dla przepływu turbulentnego oraz stosując specjalną metodę (tzw. metodę porowatości) do śledzenia warstwy powierzchniowej. Uzyskane wyniki pokazały dobre odwzorowanie zmian dennych; wypadkowe naprężenia styczne przy dnie były zbieżne z wynikami laboratoryjnymi. Nieduże błędy pojawiły się przy określeniu strefy oddziaływania ostrogi. Możliwości odwzorowania pola prędkości oraz naprężeń stycznych przy dnie w przypadku ostrogi o ścianach pionowych oraz ze skarpą pokazali Miller i in. [2003], stosując model hydrodynamiczny 3D wraz z modelem turbulencji k-ω, dla przypadku warunków ustalonych w czasie. Uzyskane wyniki wskazują na odwzorowanie głównych cech przepływu w rejonie ostróg; struktura wirowa pojawiająca się na wysokości ostrogi została odwzorowana. Porównanie obliczeń dla dwóch rodzajów ostróg pokazało, że zmiana kształtu ostrogi znacząco zmienia pole prędkości.

PODSUMOWANIE

Na podstawie badań laboratoryjnych należy stwierdzić, że sposób oddziaływania ostrogi na otaczające środowisko zależy od bardzo wielu czynników, a w szczególności warunków przepływu, rodzaju rumowiska znajdującego się na dnie rzeki, konstrukcji ostrogi (rodzaju, długości, rozmieszczenia w przestrzeni). Dotychczas prowadzono badania głównie dla prostych odcinków rzek, jednak największe problemy regulacji rzek występują na zakolach, co znajduje swoje odzwierciedlenie w praktyce inżynierskiej. Dostępne aktualnie modele matematyczne nie są w pełni przygotowane do odwzorowania złożonej rzeczywistości.

BIBLIOGRAFIA

Audusse E., Bristeau M.O., Perthame B. *Kinetic schemes for Saint Venant equations with source terms on unstructured grids*. No 3989, INRIA, Rocquencourt, France, 2000.

Aya S., Fujita I., Miyawaki N. *2-D Models for flows in the river with submerged groins*. XXVII IAHR Congress, San Francisco, CA, USA, 1997.

Gill M. A. *Erosion of sand beds around spur dikes*. Journal of the hydraulic Division, ASCE, vol. 98, no. HY 9, 1972, s. 1587–1602.

Ishii C., Asada H., Kishi T. *Shape of separation region formed behind a groyne of non-overflow type in rivers*. XX IAHR Congress, Moscow, USSR, 1983, s. 405–412.

Mayerle R., Toro F.M., Wang S.S.Y. *Verification of a three-dimensional numerical model simulation of the low in the vicinity of spur dikes*. Journal of Hydraulic Research, vol. 33, no. 2, 1995, s. 243–256.

Miller R., Roulund A., Sumer B.M., Fredsoe J., Truelsen C., Michelsen J. *3-D Numerical modelling of flow around a groin*. XXX IAHR Congress, Greece, 2003, s. 385–392.

Oillon S., Dartus D. *Three-dimensional computation of flow around groyne*. Journal of hydraulic Engineering, vol. 123, no. 11, 1997, s. 962–970.

Paquier A. *1-D and 2-D models for simulating dam-break waves and natural floods*. [w:] M.Morris, J.-C. Galland, P. Balabanis (red.). *Proceedings of the CADAM meeting*. Wallingford, Wielka Brytania, 1998, s. 127–140.

Paquier A., Bristeau M.O., Proust S., Riviere N., Champagne J. Y. *Comparison of 2D flow modeling around a groyne*. XXX IAHR Congress, Thessaloniki, Greece, Theme C, 2003, s. 393–400.

Rajaratnam N., Nwachukwu B. A. *Flow near groin-like structures*. Journal of Hydraulic Engineering ASCE, vol. 109, no. 3, 1983, s. 463-480.

Robakiewicz M., *Hydrodynamics in rivers trained with groins: part 1 – non-submerged single groin*. IBW PAN Report, Gdańsk 2005.

Tingsanchali T., Maheswaram S. *2-D Depth-averaged flow computation near groyne*. Journal of Hydraulic Engineering, vol. 166, no. 1. 1990, s. 71–86.

Uijttewaal W. S. J. *Effects of Groyne Layout on the Flow in Groyne Fields: Laboratory Experiments*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, vol. 131, no. 9, 2005, s. 782–791.

Yossef M.F.M. *The effect of the submergence level on the resistance of groynes*. An Experimental Investigation, the 6th Int. Conf. On Hydroscience and Engineering (ICHE-2004), Australia, 2004.

Yossef M.F.M., de Vriend H. *Mobile-bed experiments on the exchange of sediment between main channel and groyne fields*. W M. Greco, A. Carravetta, R. Della Morte (ed.), River Flow 2004, Leiden, A.A. Balkema Publishers, 2004, s. 127–133.

Małgorzata Robakiewicz
Instytut Budownictwa Wodnego Polskiej Akademii Nauk
Kościerska 7
80-328 Gdańsk, Poland
phone: (+48 58) 552 20 11
e-mail: marob@ibwpan.gda.pl

Recenzent: *Prof. dr hab. inż. Wojciech Bartnik*

Małgorzata Robakiewicz

ROLE OF GROINS IN RIVER REGULATION

SUMMARY

Groins are structures often used in lowland river regulation. The main goal of their construction is protection of coast and narrowing of the river channel to increase water depth and prolongation of the navigation period.

Analysing the influence of groins on hydrodynamics and sediment transport in rivers it is necessary to consider two cases: (1) *non-submerged* groins, when the groins top is above the water surface, and (2) *submerged* groins. In case of *non-submerged* groins the narrowing of the main channel is observed; it is accompanied by increase of water velocity leading to further deepening of the main channel. In the groin fields water flows much slower, supporting sediment deposition. In case of *submerged* groins water flows in the whole channel, but increase of resistance due to groins causes reduction of its capacity, being an important aspect in flooding periods.

Water flow is always accompanied by sediment transport, but the existing knowledge in this respect is still insufficient to allow prediction of morphological changes with high accuracy.

Groins are constructed since few centuries but not always the expected results are reached; it is not unique that they create new problems (deepening, sediment deposition). Recently laboratory experiments are carried out to solve simplified problems; less common field measurements are carried out. Tests on hydraulic models allow better understanding the mechanisms governing water and sediment movement in rivers trained by groins. They also support us with data necessary to verify mathematical models.

The on-going developments in numerical modelling result in better representation of changeable hydro- and morpho-dynamics; however the results are still far from being able to reproduce all phenomena observed in nature.

Key words: groins, hydrodynamics, bed- and suspended-load transport, river training