

JACEK KURNATOWSKI¹, ANNA ROSZAK¹

FORMY DENNE DOLNEJ ODRY

Dolna Odra na odcinku od Widuchowej do Zalewu Szczecińskiego jest jednym z najbardziej skomplikowanych układów rzecznych w Europie. Pomimo wielu lat badań szereg zagadnień związanych z tym akwenem nadal pozostaje nierozpoznanych. Do tej grupy należy między innymi problem typu form dennych występujących na dnie akwenu, ich zmienność oraz wpływ tych form na warunki rozptyłów wód w sieci dolnej Odry. Dotyczy to przede wszystkim Odry Zachodniej i Odry Wschodniej, które są korytami długimi w porównaniu do koryt innych odcinków sieci, przez co posiadają znaczący wpływ na warunki rozptyłów w całej sieci.

Formy denne, a zwłaszcza tzw. mezoformy, stanowią jeden z najbardziej istotnych, a jednocześnie najbardziej skomplikowanych problemów hydrauliki koryt aluwialnych. Udowodniono, że istnienie form może wpływać nie tylko na wartość współczynnika szorstkości koryta, ale nawet modyfikować postać wzoru Chezy-Manninga. Liu i Hwang (1959) wykazali, że przy założeniu ogólnej postaci wzoru na prędkość średnią ruchu ustalonego w korycie aluwialnym w postaci

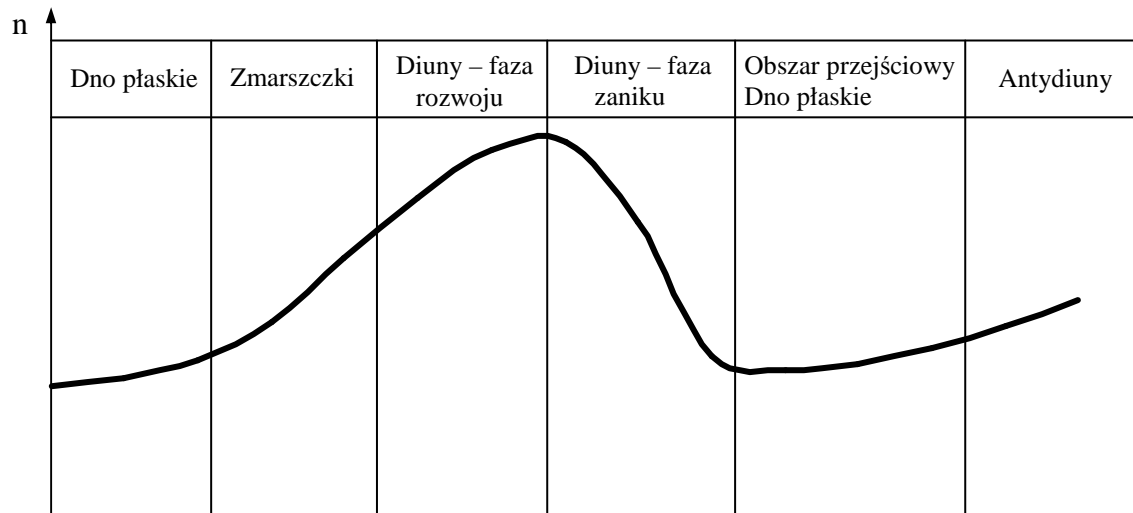
$$v = \frac{1}{n} R_h^x I^y \quad (1)$$

gdzie: v - prędkość średnia [ms^{-1}]; n - współczynnik szorstkości według Manninga [$\text{m}^{-1/3}\text{s}$]; R_h - promień hydrauliczny [m]; I - spadek podłużny linii energii [-]; wartości wykładników x i y , przyjmowane standardowo jako stałe i równe odpowiednio 0,667 i 0,500, przy małych średnicach uziarnienia rumowiska wlezonego tworzącego diuny (rzędu 0,01 – 0,1 mm) mogą osiągać wartości $x = 0,351$ i $y = 0,298$. W tych samych warunkach istnienie diun może zwiększyć współczynnik szorstkości nawet dwudziestokrotnie w stosunku do dna płaskiego. Wpływ ten zanika całkowicie dopiero przy średnicach rzędu 3 – 10 mm. Wynika stąd, że przy obliczeniach hydraulicznych koryt o dnie piaszczystym, łącznie z frakcją piasku grubego, wpływu form dennych nie powinno się pomijać, gdyż może to prowadzić do poważnych błędów.

Wartość współczynnika szorstkości zmienia się nieliniowo wraz z rozwojem kolejnych form dennych przy wzroście prędkości wody w korycie. Charakter tych zmian przedstawia rys. 1. Przy braku form zmienność współczynnika szorstkości jest niewielka. Współczynnik zaczyna rosnąć w miarę rozwoju zmarszczek, a następnie diun. Gdy diuny zaczynają zanikać, a ruch rumowiska przechodzi do fazy tzw. obszaru przejściowego, charakteryzującego się ponownym brakiem form, wartość współczynnika maleje osiągając swoje minimum na początku obszaru przejściowego. Kolejnym etapem zmian współczynnika jest jego powolny wzrost w obszarze przejściowym. Przy antydiunach będących ostatnią

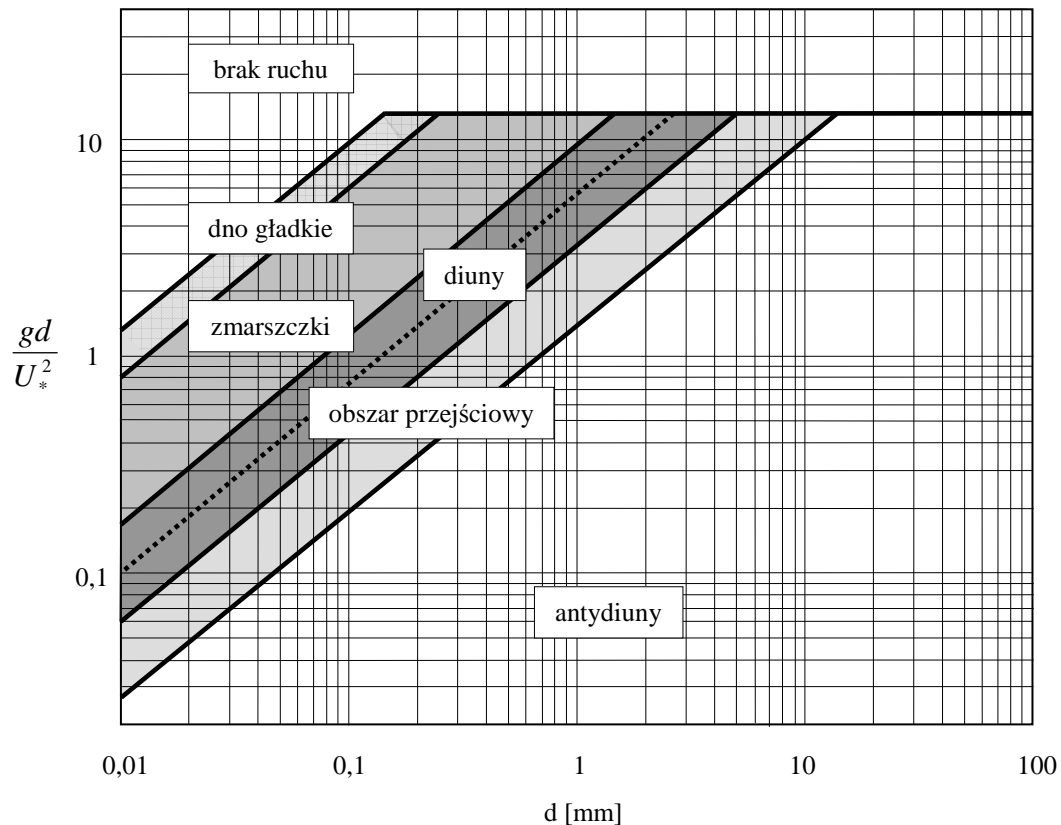
¹ Politechnika Szczecińska, Szczecin

formą denną posługiwanie się wielkościami występującymi we wzorze Chezy-Manninga staje się utrudnione, a nawet wręcz niemożliwe, bowiem wówczas ruchy wody i rumowiska wykazują bardzo silną burzliwość.



Rys. 1. Zmiany współczynnika szorstkości dna przy różnych typach form dennych (na podstawie: Arcement, 1989)

Szereg badań wykazało, że przejścia pomiędzy poszczególnymi formami dla zadanej średnicy i ciężaru właściwego ziaren następują przy określonych wartościach przydennych naprężeń stycznych, zatem zależą od głębokości i spadku zwierciadła wody. Bogárdi (1978) podał zależności pozwalające określić typ formy dennej w zależności od uziarnienia i parametrów ruchu strumienia. Zależności te przedstawia rys. 2.

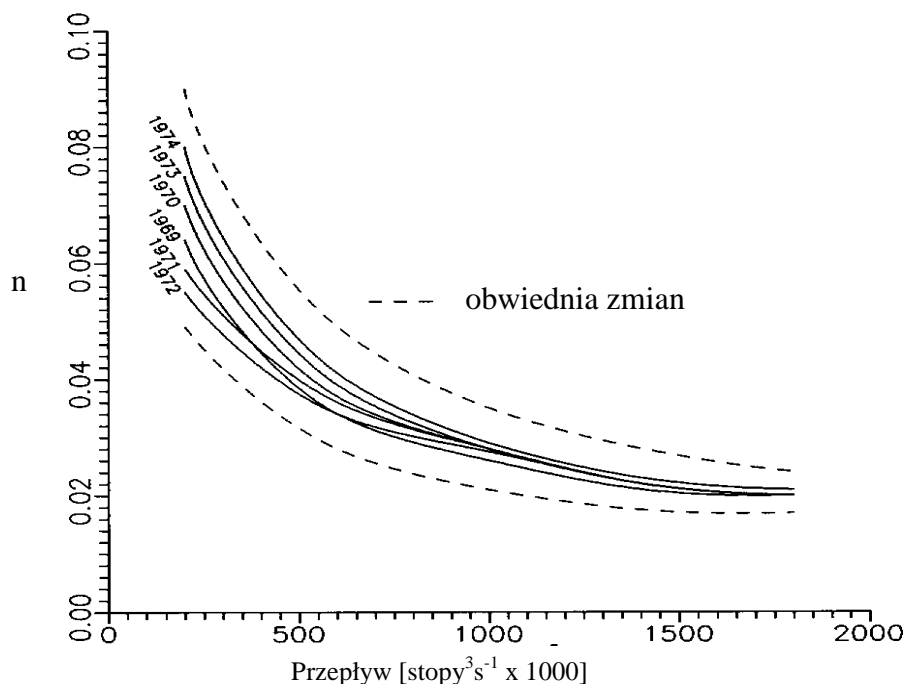


Rys. 2. Warunki występowania poszczególnych typów form dennych (na podstawie: Bogárdi, 1978)

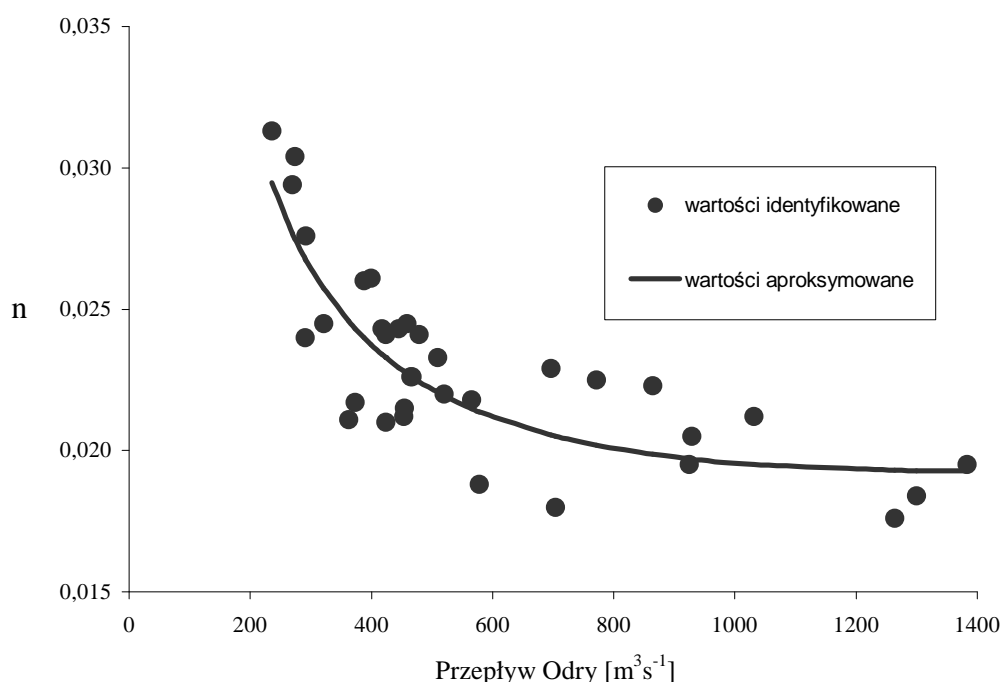
Wykres ten został wykonany przy założeniu, że gęstość ziaren rumowiska wynosi $2650 \text{ [kg/m}^3\text{]}$, zaś temperatura wody $20 \text{ [}^\circ\text{C]}$. Bezwymiarowy czynnik zwany czynnikiem stabilności koryta (*channel stability factor*) występujący na osi pionowej wykresu zależy od g - przyspieszenia ziemskiego $\text{[m}\cdot\text{s}^{-2}\text{]}$, d - charakterystycznej średnicy ziaren rumowiska [m] oraz U_* - prędkości dynamicznej $\text{[m}\cdot\text{s}^{-1}\text{]}$. Przy wartości tego czynnika przekraczającej 12,91 ruch rumowiska wleczonego niezależnie od średnicy nie zachodzi, natomiast przy wartościach mniejszych pojawiają się formy denne, przy czym przy małych średnicach uziarnienia występują wszystkie ich typy, a w miarę wzrostu średnicy różnorodność typów maleje. Przy czynniku stabilności koryta równym lub nieco mniejszym od 12,91 poczynając od wartości $d \cong 1,5 \text{ [mm]}$ rumowisko ze stanu spoczynku przechodzi bezpośrednio w formę diun, które przy $d \cong 5 \text{ [mm]}$ zanikają przechodząc w obszar przejściowy, a przy $d > \text{ok. } 15 \text{ [mm]}$ nie wykształcają się już żadne formy poza antydiunami.

Autor wykresu nie rozgraniczył, niestety, fazy rozwoju i zaniku diun, co uniemożliwia dokładne określenie warunków, przy których występuje maksymalna wysokość form dennych i maksymalna szorstkość koryta. Do dalszych rozważań przyjęto orientacyjnie, że linia rozgraniczająca obie fazy na wykresie znajduje się w połowie szerokości obszaru diun (linia kropkowana).

Poza przypadkami oczywistego wpływu zarastania koryta i zjawisk lodowych, jak również zmiennego udziału brzegów koryt przy różnych napełnieniach, zmiany współczynnika szorstkości koryt aluwialnych, identyfikowanego na podstawie pomiarów polowych, tłumaczone są głównie oddziaływaniem form dennych. Między innymi w dolnym odcinku Missisipi w przekroju Arkansas obserwuje się monotoniczne zmniejszanie szorstkości wraz ze wzrostem przepływu (rys. 3), co tłumaczy się zanikiem form dennych i przejściem do reżimu obszaru przejściowego (Engineering Manual, 1993). Interpretacja ta stała się tak powszechna, że nawet podręcznik obsługi jednego z najbardziej znanych na świecie narzędzi do rozwiązywania problemów hydrauliki koryt otwartych HEC-RAS (2005) uogólnia ten przypadek (oczywiście błędnie!) na wszystkie koryta aluwialne, podając zmniejszanie się szorstkości wraz ze wzrostem przepływu jako generalną cechę koryt rzecznych.



Rys. 3. Zmiany szorstkości Missisipi w przekroju Arkansas (Engineering Manual, 1993)



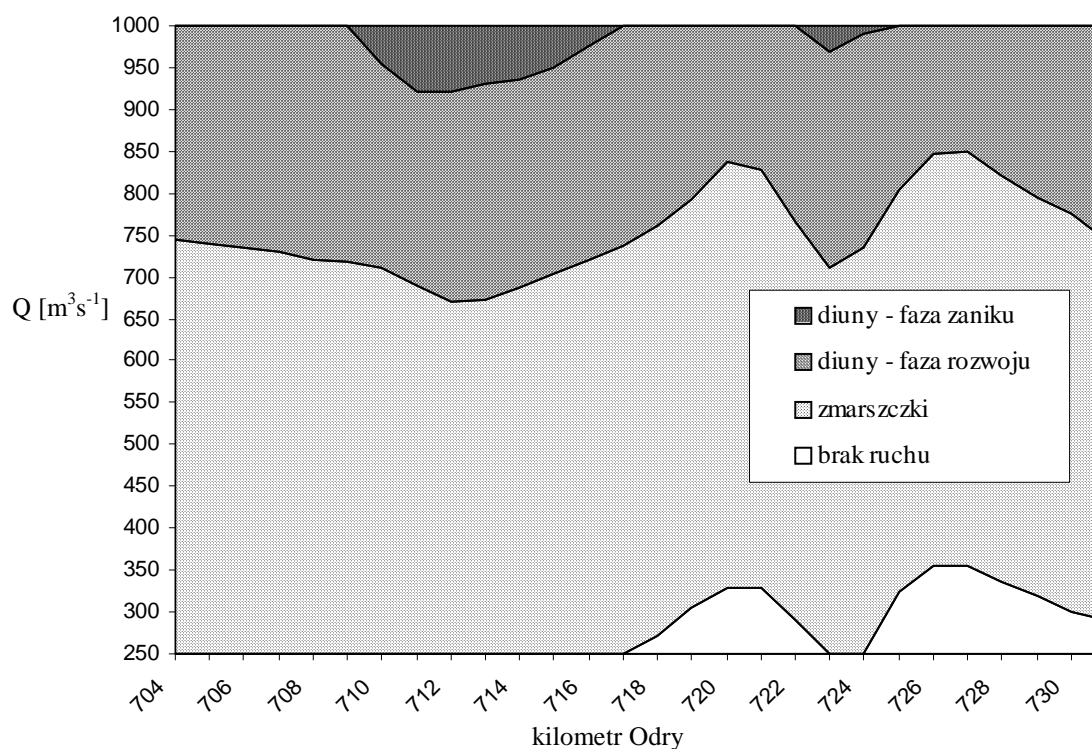
Rys. 4. Zmiany szorstkości dolnej Odry w układzie Kronsztad 86 (na podstawie: Kurnatowski, 2004)

Współczynnik szorstkości dolnej Odry na odcinku Widuchowa – Trzebież, traktowany jako wypadkowy dla całej sieci rzek i kanałów akwenu, wykazuje podobne tendencje do zmniejszania wartości w miarę wzrostu przepływu (rys. 4), jednak dotychczasowa interpretacja przyczyn tego zjawiska jest całkowicie odmienna; zmienność identyfikowanej szorstkości wynika z nieuwzględnienia w pomiarach rzędnych zwierciadła wody nierównoległości zerowych powierzchni odniesienia stosowanych układów wysokości (np. obowiązującego obecnie układu Kronsztad 86) względem rzeczywistego, fizycznego poziomu, jakim jest powierzchnia geoidy (Kurnatowski, 2004 a,b). Przy bardzo małych (rzędu kilku milimetrów na kilometr) spadkach zwierciadła wody w Odrze błędy określenia wartości tych spadków wynikające z powyższych nierównoległości rzutują na identyfikowany współczynnik szorstkości w istotny sposób. Teza ta może być jednak obalona, jeśli się dowiedzie, że przy wzroście przepływu w całym badanym przedziale występuje zmniejszenie chropowatości dna, a zatem i współczynnika szorstkości, wskutek zaniku form dennych i przechodzenia do obszaru przejściowego z dnem płaskim.

Do badania form dennych dolnej Odry przyjęto następujące założenia:

1. Obszar badań zawężono do Odry Zachodniej i Odry Wschodniej na odcinku węzeł Widuchowa – kanał Klucz-Ustowo (km 704-731). Wynika to z faktu, że oba odcinki są zdecydowanie najdłuższymi w całym układzie, przez co ich szorstkość posiada największy wpływ na przeciętną szorstkość układu. Ponadto na większości pozostałych odcinków występują namuły organiczne nie tworzące jakichkolwiek form.
2. W węźle Widuchowa zachodzi proces sortowania rumowiska opisany przez Roszak (2004, 2005), a skład granulometryczny rumowiska wleczonego wzdłuż obu badanych odcinków nie ulega dalszym przekształceniom.
3. Rozdział przepływów w węźle Widuchowa następuje zgodnie z instrukcją pracy jazu Widuchowa.

Przy powyższych założeniach dla przepływów łącznych Odry od $Q = 250 \text{ [m}^3\text{s}^{-1}]$ do $Q = 1000 \text{ [m}^3\text{s}^{-1}]$ w przedziałach co $50 \text{ [m}^3\text{s}^{-1}]$ na podstawie algorytmu Roszak (2004) określono wartości miarodajnych średnic rumowiska wlezonego. Spadki podłużne i głębokości do wartości czynnika stabilności koryta Bogárdi'ego obliczano na podstawie matematycznego modelu rozpliwów wody w sieci Odry (Kurnatowski, 1989) w układzie Kronsztad 86. Model był uruchamiany przy przyjęciu braku oddziaływania wiatru. Rzędna zwierciadła wody w Trzebieży stanowiąca dolny warunek brzegowy modelu była stała i wynosiła 0 m Kr (stan 508 cm), a szorstkość dla całego układu była przyjmowana jako wartość zmienna w zależności od przepływu zgodnie z wartościami aproksymowanymi (na podstawie rys. 4). Wartości czynnika stabilności koryta skonfrontowano następnie z wykresem Bogárdi'ego (rys. 2) i określono typy form dennych pojawiających się wzdłuż badanych odcinków Odry.



Rys. 5. Typy form dennych występujących w Odrze Wschodniej

Wyniki obliczeń wykazały, że w badanym zakresie zmienności przepływu Odry ruch rumowiska w Odrze Zachodniej nie występuje (wartości czynnika stabilności koryta przekraczają 12,91), natomiast w Odrze Wschodniej zachowanie się dna zależy od przepływu i położenia przekroju poprzecznego.

Otrzymane typy form dennych Odry Wschodniej przedstawia rys. 5. Ruch rumowiska w korycie rozpoczyna się przy przepływie poniżej $360 \text{ [m}^3\text{s}^{-1}]$. Zmarszczki piaskowe pojawiają się praktycznie natychmiast po rozpoczęciu ruchu – forma ruchomego dna gładkiego nie występuje. Przy przepływie w granicach $700 - 800 \text{ [m}^3\text{s}^{-1}]$ zmarszczki przechodzą w diuny, które osiągają szczyt rozwoju przy przepływie przekraczającym $950 \text{ [m}^3\text{s}^{-1}]$.

Do czasu weryfikacji na podstawie odpowiednich badań terenowych powyższe wyniki należy traktować orientacyjnie z uwagi na arbitralne przyjęcie rozgraniczenia faz wzrostu i zaniku diun oraz możliwe błędy w określeniu miarodajnej średnicy rumowiska i parametrów ruchu, a zwłaszcza spadków podłużnych. Niemniej, nawet przy założeniu

kilkunastoprocentowych, a nawet jeszcze większych, błędów określenia czynnika stabilności koryta otrzymane wyniki jednoznacznie eliminują formy denne jako przyczynę zmniejszania się szorstkości koryta Odry wraz ze wzrostem przepływu, gdyż chropowatość dna wynikająca z istnienia form rośnie jeśli nie w całym badanym przedziale zmienności przepływu Odry, to przynajmniej w dużej jego części. Monotoniczne zmniejszanie się szorstkości przy wzroście przepływu, zwłaszcza w strefie przepływów niskich, musi zatem wynikać z innych czynników niż zmiana chropowatości dna.

Otrzymane wyniki wskazują również na celowość wprowadzenia zmiennej chropowatości dna związanej z transformacjami form dennych do stosowanych obecnie matematycznych modeli rozptyłów w dolnej Odrze.

Literatura

Arcement G J. Jr., Schneider V.R., Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains, United States Geological Survey Water-supply Paper 2339, 1989.

Bogárdi J., Sediment Transport in Alluvial Streams, Akadémiai Kiadó, Budapest 1978.

Engineer Manual EM 1110-2-1416 "Engineering and Design River Hydraulics", US Army Corps of Engineers, Washington, 1993.

HEC-RAS Hydraulic Reference Manual, US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, May 2005.

Liu H.-K., Hwang S.-Y., Discharge formula for straight alluvial streams. ASCE Hydraulics Division, HY 11, 1959.

Kurnatowski J., Symulacyjny model sieci rzecznej o dowolnej strukturze topologicznej na przykładzie dolnej Odry. Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej nr 389, Prace IIW nr 29, Szczecin 1989.

Kurnatowski J., Współczynniki szorstkości koryt dolnej Odry, Materiały konferencji „Regionalne problemy gospodarki wodnej i hydrotechniki”, Dziwnów, 28-30 maja 2004.

Kurnatowski J., Współczynniki szorstkości a położenie geoidy, Materiały konferencji „Regionalne problemy gospodarki wodnej i hydrotechniki”, Dziwnów, 28-30 maja 2004.

Roszak A., Rozdział rumowiska w węźle hydraulicznym z jazem, Materiały konferencji „Regionalne problemy gospodarki wodnej i hydrotechniki”, Dziwnów, 28-30 maja 2004.

Roszak A., Ruch rumowiska w rozwidleniach i połączeniach i rzecznych, Materiały konferencji „Regionalne problemy gospodarki wodnej i hydrotechniki”, Świnoujście, 3 – 5 czerwca 2005.

BED FORMS IN LOWER ODER

Summary

Bed forms are one of the most important and complicated problems of alluvial river beds hydraulics. Among others bed forms affect the Manning's roughness coefficient. The paper presents types of bed forms appearing in Western Oder while calculations applied algorithm of bed load sizing in a river junction and lower Oder flow model. It has been shown that the roughness variability of lower Oder channela does not result from bed forms appearance.

Streszczenie

Formy denne stanowią jeden z najbardziej istotnych, a jednocześnie najbardziej skomplikowanych problemów hydrauliki koryt aluwialnych. Między innymi posiadają one wpływ na wartość współczynnika szorstkości Manninga. W pracy określono typy form dennych występujących w Odrze Wschodniej, przy czym do obliczeń wykorzystano algorytm sortowania rumowiska w węźle i model rozptyłów dolnej Odry. Wykazano, że obserwowana zmienność współczynnika szorstkości koryt dolnej Odry nie wynika z faktu występowania form dennych.