

JACEK KURNATOWSKI¹

ZASTOSOWANIE WZORU COLEBROOKA-WHITE'A DO OBLICZEŃ PRZEPIYWÓW W SIECI DOLNEJ ODRY

1. Wstęp

Wzór Colebrooka-White'a, opublikowany w 1937 roku, został skonstruowany z myślą o obliczaniu strat energii w przewodach pod ciśnieniem i jest najczęściej przedstawiany w postaci (Mitosek 2001):

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} + \frac{\varepsilon}{3,71} \right) \quad (1)$$

gdzie: λ - współczynnik oporów liniowych, ε - chropowatość względna, Re - liczba Reynoldsa odniesiona do średnicy przewodu. Wartość ε określa się wzorem

$$\varepsilon = \frac{k}{d} \quad (2)$$

gdzie k jest chropowatością bezwzględną [m], d - średnicą przewodu [m]. Wzór ten obejmuje cały obszar występowania ruchu turbulentnego i na II Międzynarodowym Kongresie Wodociągowców w Paryżu w roku 1952 zyskał miano najlepszego ze wszystkich omawianych wówczas wzorów (Walden, Stasiak 1971). Równolegle trwały badania nad możliwościami zastosowania tego wzoru do przepływów wody w korytach otwartych, rozpoczęte już w 1938 roku przez Keulegana i rok później przez samego Colebrooka (Yen 2002). Autorzy badań przeprowadzonych w Wallingford (Hydraulic Research 1988) stwierdzili największą przydatność wzoru Colebrooka-White'a w całym zakresie przepływów występujących w korytach otwartych i zalecili stosowanie tego wzoru zamiast wzoru Manninga. Częściowym potwierdzeniem powyższego jest fakt, że wzór Colebrooka-White'a był z powodzeniem stosowany dla koryt otwartych nawet w warunkach subarktycznych (Helmiö, Järvelä 2004). W warunkach polskich wysoka przydatność wzoru Colebrooka-White'a do obliczeń koryt otwartych została potwierdzona również dla przekrojów złożonych (Krukowski i in. 2002). Do uniwersalizacji tego wzoru przyczyniło się między innymi uzmiennienie stałych wartości występujących we wzorze (1), przez co przybiera on postać

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -K_1 \log \left(\frac{K_2}{4 \text{Re} \sqrt{\lambda}} + \frac{k}{K_3 R} \right) \quad (3)$$

gdzie R - promień hydrauliczny [m], zaś parametry liczbowe K_1 , K_2 i K_3 w zależności od kształtu przekroju zmieniają się w granicach (Yen 2002):

$$K_1 = 2,0 - 2,14;$$

¹ Politechnika Szczecińska, Szczecin

$$K_2 = 1,7 - 7,17;$$

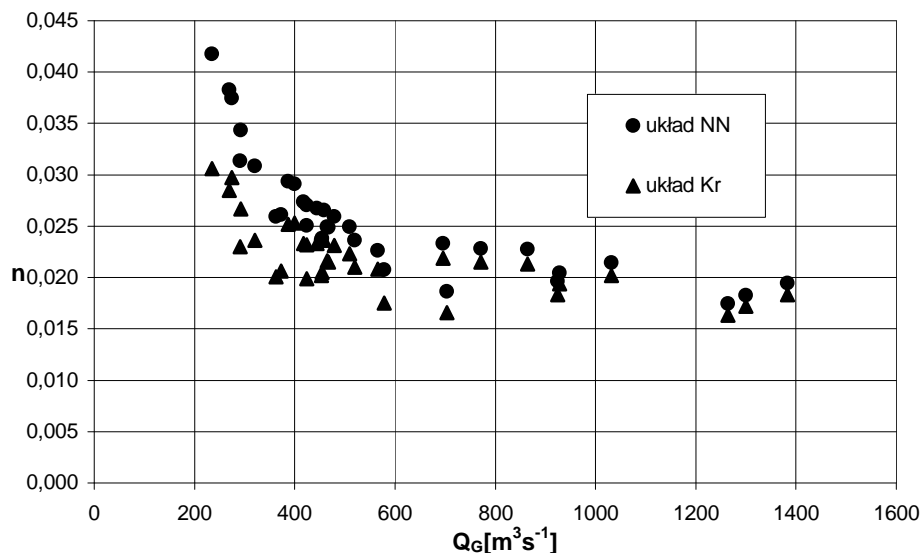
$$K_3 = 8,9 - 14,8.$$

Yen (2002) dostrzega jednak przydatność wzoru Manninga dla turbulentnych przepływów nad powierzchniami hydraulicznie szorstkimi i podkreśla jego zalety w przypadku konieczności uśredniania szorstkości po obwodzie zwilżonym i/lub długości odcinka koryta.

W niniejszej pracy podjęto próbę wykorzystania wzoru Colebrooka-White'a dla badań hydraulicznych akwenu dolnej Odry, w szczególności zaś do analizy wpływu wysokościowego układu odniesienia na wyniki identyfikacji parametrów hydraulicznych oddziałujących na opory ruchu (Kurnatowski 2004a, 2004 b).

2. Identyfikacja chropowatości koryt dolnej Odry

Metoda rozwiązania tzw. zagadnienia odwrotnego, polegającego na wyznaczeniu wartości szorstkości uśrednionej dla badanego akwenu, w przypadku dolnej Odry została podana przez Kurnatowskiego (2004a). Metoda ta zakłada, że w akwenu panuje ruch ustalony, warunkami brzegowymi są rzędne zwierciadła wody wyznaczone dla przekrojów wodowskazowych Widuchowa (przekrój zamykający górny) i Trzebież (przekrój zamykający dolny), przepływ jest określany na podstawie wodowskazu Gozdowice, zaś warunki wiatrowe pochodzą ze stacji meteorologicznej Szczecin-Dąbie. Identyfikacja szorstkości polega na takim doborze poszukiwanej wartości, przy której modelowane rzędne zwierciadła wody pokrywają się z warunkami brzegowymi, tj. rzędnymi rzeczywistymi. W pracy Kurnatowskiego (2004a) przedstawiono wyniki identyfikacji współczynników szorstkości Manninga dla 34 niezależnych przypadków, przy czym każdy z nich był określany dwukrotnie - dla rzędnych podanych w układzie NN oraz układzie Kr. W rezultacie otrzymano dwa zbiory wartości współczynników (rys. 1).



Rys. 1. Zależność współczynników szorstkości od przepływu globalnego (Kurnatowski 2004a)

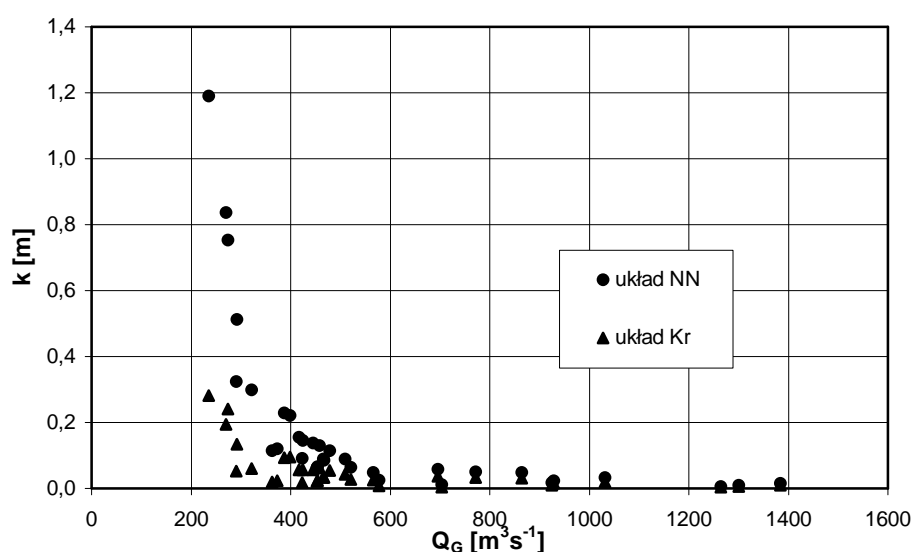
Wyraźna zależność wartości współczynników szorstkości n od przepływu globalnego w sieci Q_G wynika z faktu, że powierzchnia odniesienia zarówno dla układu NN, jak i Kr nie jest równoległa do rzeczywistej poziomej powierzchni, czyli geoidy, zatem spadki zwierciadła wody, mierzone względem powierzchni odniesienia dla danego układu, nie

odzwierciedlają rzeczywistych spadków hydraulicznych, jakie powierzchnia zwierciadła wody tworzy względem geoidy (Kurnatowski 2004b).

Do identyfikacji chropowatości dla akwenu dolnej Odry użyto wzoru Colebrooka-White'a w postaci zaproponowanej dla szerokich koryt przez Grafa w 1971 roku (Yen 2002):

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{2,77}{4 \text{Re}_R \sqrt{\lambda}} + \frac{k}{12,9R} \right) \quad (4)$$

gdzie Re_R jest liczbą Reynoldsa odniesioną do promienia hydraulicznego. Obliczenia przeprowadzono przy użyciu metody identycznej jak dla identyfikacji szorstkości dla tych samych 34 przypadków, dla których były określane szorstkości. Wartości temperatury wody w całym akwenu przyjęto jak dla stacji Widuchowa. Wyniki identyfikacji dla obu układów odniesienia przedstawia rys. 2.



Rys. 2. Zależność chropowatości od przepływu globalnego

Wyniki obliczeń wskazują, że zidentyfikowana chropowatość bezwzględna, podobnie jak współczynnik szorstkości Manninga, zależy od przepływu globalnego w sieci rzek i kanałów dolnej Odry, przy czym jej zmienność dla przepływów niskich jest jeszcze wyraźniejsza, niż zmienność szorstkości. Zależność ta jest oczywiście pozorna, gdyż otrzymane wartości chropowatości nie są wartościami rzeczywistymi, odpowiadającymi ukształtowaniu dna, a jedynie parametrami modelu. Rozbieżność pomiędzy zidentyfikowanymi wartościami a możliwymi rzeczywistymi chropowatościami koryt dolnej Odry jest oczywista zwłaszcza dla niskich przepływów, a chropowatości rzędu kilkudziesięciu centymetrów należy uznać za całkowicie nierealistyczne. Yen (2002) podaje, że chropowatości bezwzględne dla betonowych kanałów o niezatartej, szorstkiej powierzchni wynoszą nie więcej niż 18 mm.

Należy zauważyć, że istnieje związek pomiędzy współczynnikiem szorstkości a chropowatością bezwzględną. Jeśli przyjąć, że przepływ w rzece odbywa się całkowicie w strefie kwadratowej zależności oporów i wpływ liczby Reynoldsa na wartość współczynnika oporów liniowych λ jest pomijalny, wówczas wzór Colebrooka-White'a redukuje się do postaci:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -K_1 \log\left(\frac{k}{K_3 R}\right) \quad (5)$$

Ponieważ zachodzi relacja

$$C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}} = \frac{1}{n} R^{1/6} \quad (6)$$

gdzie C jest współczynnikiem do wzoru Chezy, zatem z porównania wzorów (5) i (6) otrzymuje się

$$\frac{1}{n} = a \cdot \log k + b \quad (7)$$

gdzie

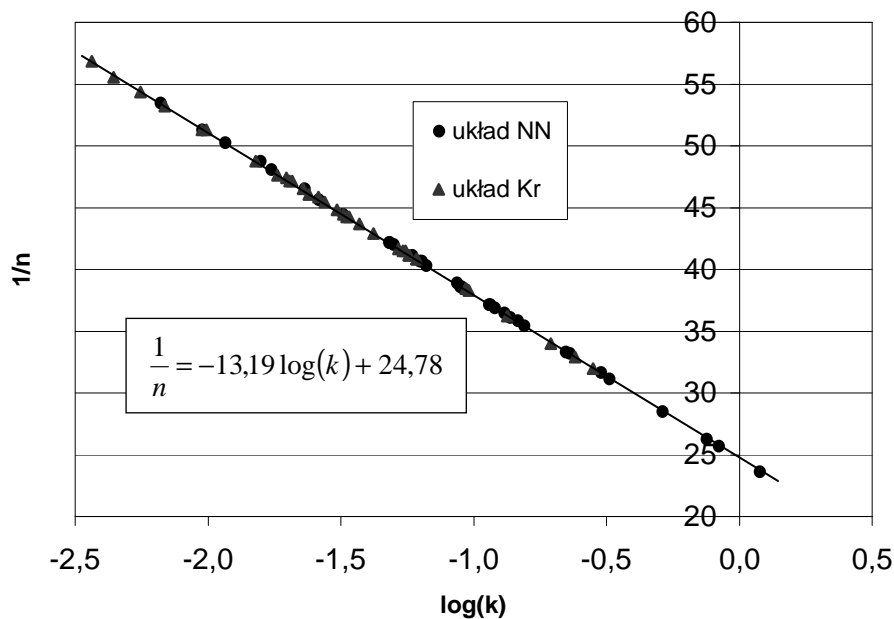
$$a = -K_1 \sqrt{8g} R^{-1/6}, \quad b = K_1 \sqrt{8g} R^{-1/6} \log(K_3 R) \quad (8)$$

Rys. 3 przedstawia zależność pomiędzy odwrotnością szorstkości a logarytmem dziesiętnym chropowatości dla badanych 34 przypadków identyfikacji w obu układach odniesienia. Zdecydowanie liniowa regresyjna zależność pomiędzy tymi wielkościami dla obu układów świadczy zarówno o kwadratowej zależności oporów przepływów dolnej Odry, jak też o pomijalnie małej zmienności współczynników regresji równania (7) opisanych wzorami (8), co jest uzasadnione niewielkimi zmianami położenia zwierciadła wody dolnej Odry w stosunku do przeciętnych głębokości tego akwenu, zatem niewielkimi względnymi zmianami promieni hydraulicznych koryt. Z porównania wzorów (8) z wartościami współczynników równania regresji podanego na rys. 3 wynika zatem, że przeciętny pod względem jego wpływu na opory ruchu promień hydrauliczny dolnej Odry, uśredniony dla wszystkich koryt akwenu w zakresie badanej zmienności stanów wynosi ok. 5,85 m.

3. Wnioski

Wyniki przeprowadzonych obliczeń sugerują możliwość zastosowania wzoru Colebrooka-White'a do wyznaczania oporów ruchu w korytach dolnej Odry, a w konsekwencji i przepływów w poszczególnych odcinkach sieci na równi ze wzorem Manninga. Obserwowana zmienność przeciętnej chropowatości bezwzględnej, podobnie jak zmienność współczynnika szorstkości, jest wynikiem nierównoległości powierzchni odniesienia dla układu, w którym wyznacza się rzędne zwierciadła wody, w stosunku do geoidy. Chropowatość wydaje się być daleko czulszym wskaźnikiem tej nierównoległości niż szorstkość, co nasuwa przypuszczenia o wyższości wzoru Colebrooka-White'a nad wzorem Manninga, przynajmniej do badań nad położeniem geoidy. Hipoteza o rzeczywistej przydatności wzoru Colebrooka-White'a do obliczeń przepływów dolnej Odry i jego ewentualnej wyższości nad wzorem Manninga będzie jednak mogła być zweryfikowana dopiero na podstawie odpowiednich symulacyjnych badań porównawczych oraz badań terenowych. Badania symulacyjne powinny wykazać istnienie ewentualnych różnic w wartościach przepływów na poszczególnych odcinkach sieci przy użyciu obu metod, zaś wyniki badań terenowych (pomiarów przepływów w warunkach ruchu quasi-ustalonego) będą stanowić nie tylko ostateczne rozstrzygnięcie problemu określania oporów ruchu, ale przede wszystkim weryfikację ogólnej poprawności stosowanego matematycznego modelu

rozplywów w sieci rzek i kanałów dolnej Odry, a zwłaszcza poprawności założenia o zunifikowanej dla całego akwenu wartości parametrów szorstkości lub chropowatości.



Rys. 3. Związek szorstkości i chropowatości dla dolnej Odry

Literatura

- Helmiö T., Järvelä J., Hydraulic aspects of environmental flood management in boreal conditions, Boreal Environment Research Vol. 9, Helsinki, 2004.
- Hydraulic Research, Assessing the hydraulic performance of environmentally acceptable channels, Report EX 1799, Wallingford, Great Britain, 1988.
- Kurnatowski J., Współczynniki szorstkości koryt dolnej Odry, materiały konferencji „Regionalne problemy gospodarki wodnej i hydrotechniki”, Dziwnów, 28-30 maja 2004 (a).
- Kurnatowski J., Współczynniki szorstkości a położenie geoidy, materiały konferencji „Regionalne problemy gospodarki wodnej i hydrotechniki”, Dziwnów, 28-30 maja 2004 (b).
- Krukowski M., Kubrak E., Kubrak J. Przedwojski B., Obliczanie przepustowości koryt o złożonych przekrojach poprzecznych, Gospodarka Wodna nr 5, 2002.
- Mitosek M., Mechanika płynów w inżynierii i ochronie środowiska, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2001.
- Walden H., Stasiak J., Mechanika cieczy i gazów w inżynierii sanitarnej, Arkady, Warszawa, 1971.
- Yen B.C., Open Channel Flow Resistance, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, January 2002.

APPLICATION OF THE COLEBROOK-WHITE FORMULA FOR LOWER ODER NETWORK FLOWS

Summary

The paper presents application of the Colebrook-White formula instead conventionally used Chezy-Manning equation for calculations of flows and water levels within lower Oder rivers and channels network. For 34 independent cases of semi-steady flows the identification of the roughness height averaged for the entire area has been performed. The results show that identified value, similarly to the identified averaged Manning's roughness coefficient, varies due to the height reference system being applied.

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki zastosowania wzoru Colebrooka-White'a zamiast standardowo używanego wzoru Chezy-Manninga w obliczeniach przepływów oraz rzędnych zwierciadła wody w sieci rzek i kanałów dolnej Odry. Identyfikację uśrednionej dla całego akwenu wartości chropowatości przeprowadzono dla 34 niezależnych przypadków quasi-ustalonego ruchu wody. Wyniki obliczeń wskazują, iż identyfikowana chropowatość, podobnie jak identyfikowany uśredniony współczynnik szorstkości Manninga, podlega zmianom w zależności od przyjętego wysokościowego układu odniesienia.