

*Janusz Urbański, Piotr Siwicki*

**ZASTOSOWANIE PROGRAMU CFD FLUENT  
DO OBLICZEŃ CHARAKTERYSTYK TURBULENCJI  
STRUMIENIA W DOLNYM STANOWISKU JAZU**

---

***APPLICATION OF CFD FLUENT PROGRAM  
TO CALCULATIONS OF TURBULENCE CHARACTERISTICS  
IN DOWNSTREAM OF WEIR***

**Streszczenie**

W artykule porównano wyniki pomiarów i obliczeń prędkości oraz intensywności turbulencji strumienia w dolnym stanowisku jazu. Doświadczenia przeprowadzono na modelu budowli z wypływem wody spod zasuw, niecką do rozpraszania energii i poziomym umocnieniem dna za wypadem. Piony pomiarowe rozmieszczone były w osiowej płaszczyźnie koryta wzdłuż strumienia w dolnym stanowisku. Pomiary prędkości wykonano nad płaskim, poziomym, nierozmywalnym dnem oraz nad rozmytym w określonym czasie, a następnie odpowiednio ustabilizowanym dnem za umocnieniem. Do pomiarów wykorzystano sondę PEMS rejestrującą chwilowe wartości poziomych składowych wektora prędkości. Wyniki pomierzonych charakterystyk turbulencji porównano z obliczonymi programem CFD Fluent, służącym między innymi do modelowania przepływów cieczy [Fluent 2001]. Obliczenia przeprowadzono za pomocą dostępnego w programie modelu  $k-\varepsilon$  standard. Uzyskano zadowalającą zgodność wyników pomiarów i obliczeń.

**Słowa kluczowe:** rozmycie miejscowe, modelowanie, turbulencja strumienia

***Summary***

*The paper describes a comparison measured results and calculated velocity and turbulence intensity in downstream of weir. Investigations were conducted on model of the tired construction with outflow over gate, stilling pool and horizontal protection behind apron. Measure section were located on axial plane of channel. Measurements of velocity were executed on flat, horizontal bed and eroded bed. To measurements was used PEMS probe of registering temporary horizontal com-*

*ponent value of vector of velocity. Results of measured characteristics of turbulence was compared from calculated by CFD Fluent program. To calculation model  $k-\varepsilon$  standard was used. Results obtained using these models were examined. In general, flowfields, velocities and turbulence predicted by FLUENT showed close agreement with relevant experimental results.*

**Key words:** local scour, modeling, turbulence of stream

## WSTĘP

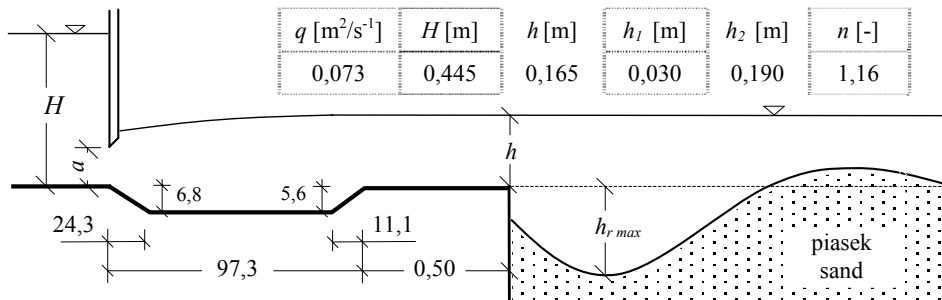
Specyficzne cechy strumienia w dolnym stanowisku jazu, takie jak wzmożona burzliwość oraz zwiększone prędkości przepływu w pobliżu dna powodują nasilenie procesów erozji koryta rzeki. Nadmierny, niekontrolowany rozwój miejscowego rozmycia może stanowić zagrożenie dla stateczności budowli piętrzącej. Całkowite zabezpieczenie koryta przed rozmywaniem jest kosztowne i niepożądane w naturalnym środowisku rzeki i doliny. W związku z tym na etapie projektowania budowli bardzo ważna jest umiejętność przewidywania kształtu i rozmiarów wyboju w celu oceny ryzyka awarii budowli i możliwości zastosowania rozwiązań ograniczających rozwój erozji.

Rozpoznanie i opisanie bezpośrednich przyczyn tworzenia się lokalnych rozmyć umożliwiają pomiary charakterystyk turbulencji strumienia za wypadem i w obszarze erodowanego dna. Problem ten stanowił przedmiot obszernych badań, które z uwagi na wysoki stopień złożoności zjawiska najczęściej mają charakter empiryczny. Turbulencją strumienia poniżej budowli zajmowali się między innymi: Rajaratnam [1976], Błażejewski i Zawadzki [2001], Dąbkowski i Urbański [2004]. Empirycznego opisu turbulentnego strumienia za odskokiem hydraulicznym dokonał Kališ [1961]. Rozkłady prędkości w ukształtowanym dole rozmycia analizowali, między innymi Popova [1970] i Rajaratnam i Berry [1977]. W literaturze spotkać można wiele równań empirycznych na maksymalną głębokość rozmycia z uwzględnieniem charakterystyk turbulencji strumienia [Rosiński 1961; Popova 1985; Urbański 2005].

Laboratoryjne badania rozmyć i pomiary charakterystyk turbulencji strumienia są kłopotliwe, pracochłonne i kosztowne. Odkąd do rozpoznania tych zjawisk można zaadaptować metody symulacji komputerowej znacznie powiększyły się możliwości badań. Symulacje komputerowe procesu tworzenia się rozmyć mogą być alternatywą dla badań na modelach fizycznych. Zaletą ich jest to, że dzięki różnym opcjom, jakie można programować oraz dzięki elastyczności w geometrycznym definiowaniu modeli, efekt końcowy badania można uzyskać w stosunkowo krótkim czasie i niewielkim nakładem kosztów. W związku z licznymi publikacjami zawierającymi dane doświadczalne wyniki symulacji komputerowych mogą być z nimi porównywane i bardziej wiarygodne. W pracy podjęto próbę modelowania przepływu turbulentnego za pomocą programu CFD Fluent. Wyniki symulacji komputerowej porównano z uzyskanymi w trakcie doświadczeń na fizycznym modelu budowli.

## METODYKA I MATERIAŁY BADAWCZE

Do weryfikacji wyników obliczeń programem CFD Fluent wykorzystano wyniki pomiarów przeprowadzonych na modelu jazu z płaskim zamknięciem zasuwowym, niecką wypadową i poziomym umocnieniem dna w dolnym stanowisku. Schemat modelu wraz z wymiarami w (cm) i wartości podstawowych parametrów charakteryzujących strumień zamieszczono na rysunku 1. Model wykonany był w korycie prostokątnym o szerokości 1,0 m.



**Rysunek 1.** Schemat modelu badawczego i parametry hydrauliczne strumienia w doświadczeniach

**Figure 1.** Schema of investigated model and hydraulic parameters of stream

Strumień wody wypływał spod zasuwę podniesioną na wysokość 0,049 m nad dnem w górnym stanowisku. W niecce powstawał i utrzymywany był odskok hydrauliczny, którego współczynnik zatopienia  $n$  przyjęto za Dąbkowskim i in. [1982] jako:  $n = \frac{h + D}{h_2}$ , gdzie  $D$  jest głębokością niecki, a  $h_2$  drugą głębokością sprzężoną. Za pierwszą głębokość sprzężoną  $h_1$  przyjęto najmniejszą głębokość strumienia za zasuwą, nazywaną przez Čertousova [1962] głębokością zdławioną i obliczaną jako  $h_1 = \varepsilon a$ , gdzie  $\varepsilon$  jest współczynnikiem dławienia. Jego wartość zawarta w przedziale (0,615÷0,69) zależna jest według Żukowskiego [Kiselev 1974] od stosunku  $a/H$ . Drugą głębokość sprzężoną  $h_2$  obliczono z równania (1):

$$h_2 = \frac{h_1}{2} \left( \sqrt{1 + 8 \frac{q^2}{gh_1^3}} - 1 \right) \quad (1)$$

Doświadczenie laboratoryjne przeprowadzono w następujących etapach [Urbański 2003]:

– pierwszy etap polegał na wykonaniu pomiarów prędkości w pionach rozmieszczonych w osiowej płaszczyźnie koryta na długości strumienia za umocnieniem w dolnym stanowisku nad płaskim, poziomym i odpowiednio

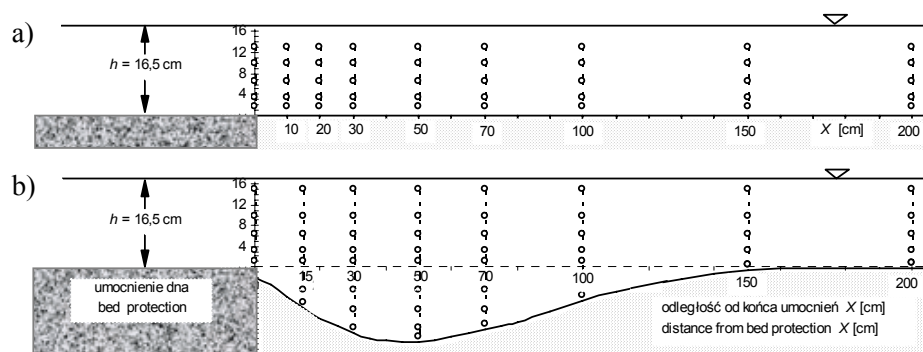
ustabilizowanym dnem w celu rozpoznania warunków początkowych tworzenia się rozmycia,

– w drugim dno koryta za umocnieniem poddano ośmiogodzinnemu rozmywaniu przez strumień wody o zadanych parametrach (tabela na rys. 1), a następnie uformowaną powierzchnię wyboju ustabilizowano kilkakrotnie ją lakierując,

– w trzecim etapie wykonano pomiary prędkości w pionach osiowej płaszczyny nad rozmytym i stabilnym dnem za umocnieniem.

Jako materiał rozmywalny na modelu wykorzystano piasek o następujących średnicach charakteryzujących jego uziarnienie:  $d_5 = 0,42$  mm,  $d_{10} = 0,53$  mm,  $d_{16} = 0,64$  mm,  $d_{50} = 1,10$  mm,  $d_{60} = 1,40$  mm,  $d_{84} = 2,00$  mm,  $d_{90} = 2,40$  mm,  $d_{95} = 2,50$  mm.

Pomiary prędkości wykonywano w pionach pomiarowych, które zlokalizowane były w różnych odległościach  $X$  od końca umocnień (rys. 2). W doświadczeniach z dnem płaskim w każdym pionie pomiar wykonano w pięciu punktach rozmieszczonych następująco: p1 w odległości 1 cm nad dnem, p2 na wysokości  $0,2 h$  nad dnem, p3 –  $0,4 h$ , p4 –  $0,6 h$ , a p5 na głębokości 2 cm pod zwierciadłem wody. Nad dnem rozmytym, w związku ze zmienną głębokością strumienia liczba punktów w pionie zmieniała się od 5 do 9. Do pomiarów wykorzystano elektrosondę PEMS rejestrującą chwilowe wartości poziomych składowych prędkości z częstotliwością 0,1 s. Czas pomiaru w punkcie wynosił 120 s. Uzyskiwano zatem ciągi  $v_x$  i  $v_y$  o liczebności 1200 elementów dla każdego kierunku. Na podstawie ciągów wartości  $v_x$  obliczono w każdym punkcie wartość średnią tej składowej  $V$  i względną intensywność turbulencji  $\varepsilon_i = \frac{\sigma}{V}$ , gdzie  $\sigma$  jest odchyleniem standardowym.



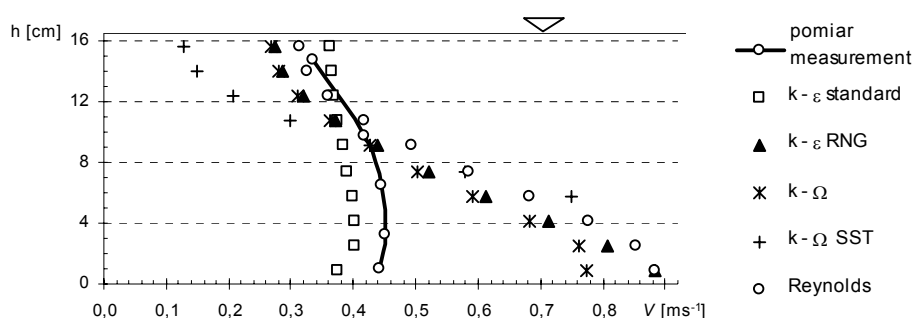
**Rysunek 2.** Lokalizacja pionów do pomiaru prędkości nad dnem płaskim (a) i rozmytym (b)

**Figure 2.** Location of section to velocities measure flat bed (a) and eroded bed (b)

Dla modelu o tej samej geometrii i tych samych parametrów hydraulicznych przeprowadzono symulację programem CFD Fluent.

### WYNIKI BADAŃ

Do wstępnej analizy, której celem była identyfikacja modelu numerycznego najlepiej opisującego badane zjawisko wybrano przekrój zlokalizowany na końcu umocnień. Wyniki pomiarów prędkości w osiowym pionie tego przekroju porównano z wynikami obliczeń numerycznych wykonanych pięcioma modelami proponowanymi przez CFD Fluent dla przepływów turbulentnych [Fluent 2001] (rys. 1).

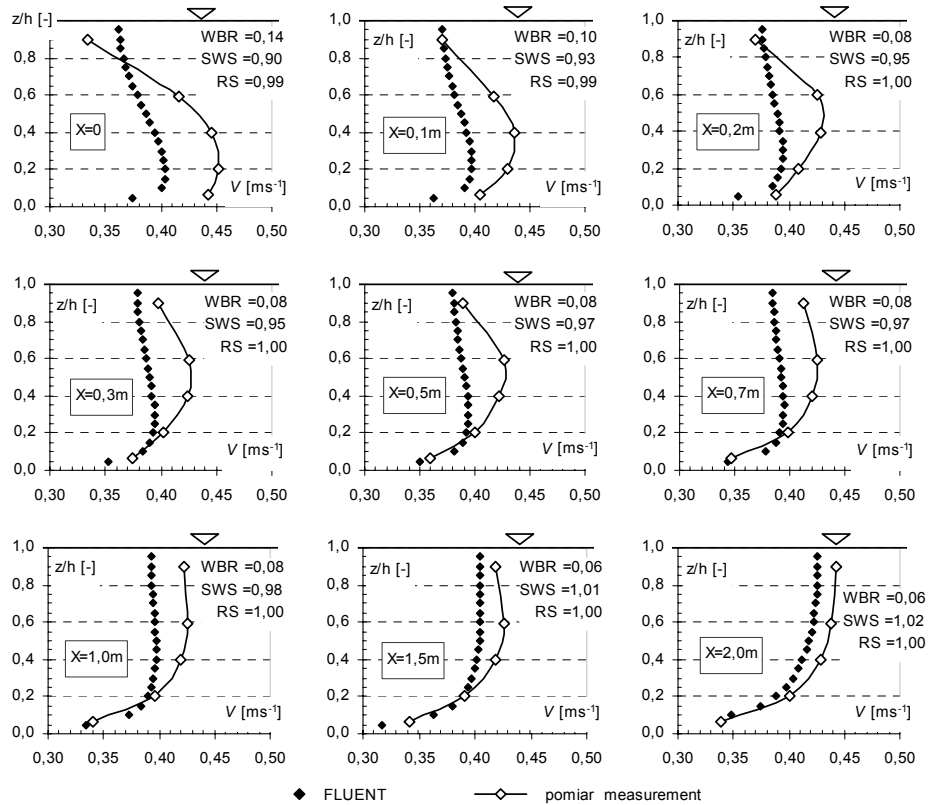


**Rysunek 3.** Porównanie pomierzonego na końcu umocnień rozkładu prędkości z obliczonymi programem FLUENT za pomocą różnych modeli turbulentnych

**Figure 3.** Comparison measured velocity at the end of bed protection with investigation the suitability of the FLUENT package for different turbulence models

Największe podobieństwo rozkładów prędkości: pomierzonego i obliczonego uzyskano dla modelu  $k-\varepsilon$  standard i w związku z tym do dalszych obliczeń numerycznych wykorzystano ten model jako najbardziej odpowiedni do opisu badanego zjawiska. Pozostałe modele nie dały zadowalających wyników.

Pomierzone na modelu z płaskim i stabilnym dnem rozkłady prędkości w pionach porównano z wynikami obliczeń programem CFD Fluent i przedstawiono na rysunku 4, gdzie  $X$  oznacza odległość pionu pomiarowego od końca umocnień dna w dolnym stanowisku, a  $z$  odległość punktu od dna. Wzajemne położenie linii na wykresach wskazuje, że uzyskano dużą zgodność wyników pomiarów laboratoryjnych i symulacji komputerowej. Obliczone i zamieszczone na rysunku 4 wartości podstawowych miar statystycznych [za Błażejewskim 1999], tzn. względnego błęd różnicowego  $WBR$ , stosunku wartości średnich  $SWS$  i specjalnego współczynnika korelacji  $RS$  pozwalają klasyfikować model  $k-\varepsilon$  standard jako bardzo dobry.

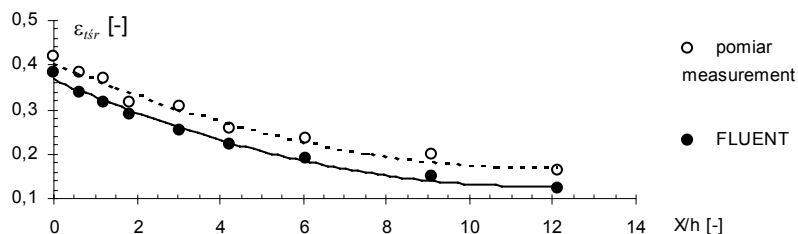


**Rysunek 4.** Rozkłady prędkości nad płaskim dnem w dolnym stanowisku uzyskane na modelu fizycznym i numerycznym

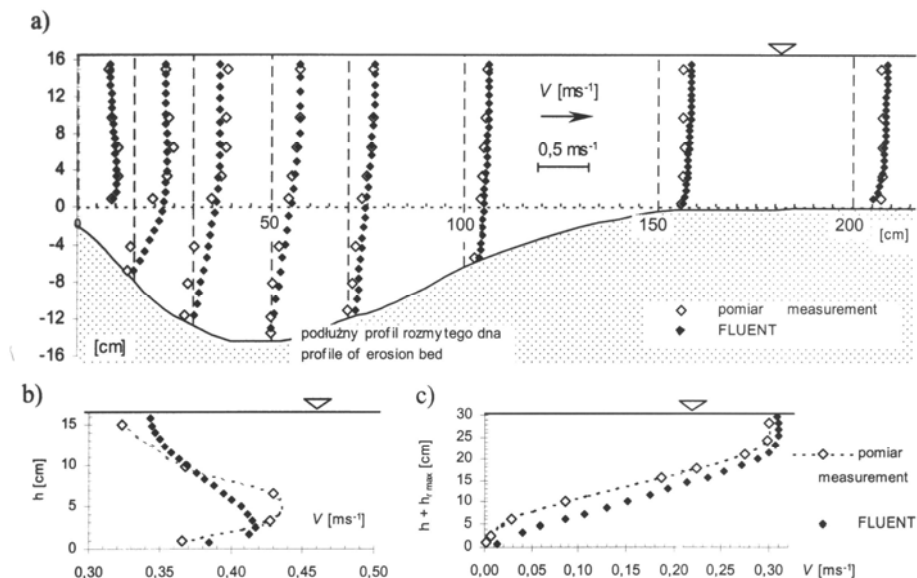
**Figure 4.** Distribution of velocity for flat bed in downstream obtained from physical and numeric model

Na podstawie wyników pomiarów chwilowych prędkości obliczono wartości względnej intensywności turbulencji  $\varepsilon_t$  w punktach pomiarowych, a następnie średnie w pionach  $\varepsilon_{t,śr}$  i porównano je z obliczonymi programem CFD Fluent (rys. 5). Intensywność turbulencji nazywana stopniem burzliwości strumienia maleje wraz z odległością  $X$  od końca umocnień w dolnym stanowisku. W przypadku tej charakterystyki turbulencji uzyskane wyniki obliczeń numerycznych były o około 15% mniejsze od wartości pomierzonych na modelu laboratoryjnym.

Porównanie rozkładów prędkości pomierzonych nad rozmytym w czasie ośmiu godzin i ustabilizowanym dnem z obliczonymi programem CFD Fluent przedstawiono na rysunku 6.



**Rysunek 5.** Zmienność intensywności turbulencji nad płaskim dnem w dolnym stanowisku na podstawie pomiarów i obliczeń  
**Figure 5.** Variability of turbulence intensity for flat bed in downstream base on measurements and calculations



**Rysunek 6.** Porównanie pomierzonych rozkładów prędkości z obliczonymi programem Fluent nad rozmytym i ustabilizowanym dnem (a), w pionie na końcu umocnień (b) i w miejscu występowania największego rozmycia (c)  
**Figure 6.** Comparison between the experimental and Fluent's velocity distributions for eroded bed (a), at the end of protection (b) and in place of occurrence of maximum depth of scour (c)

Wzajemne położenie punktów uzyskanych z pomiarów i obliczeń wskazuje na zadowalającą zgodność wyników. Kształty rozkładów sporządzonych na podstawie obliczeń numerycznych wskazują na dość dobrą interpretację przez program specyficznych warunków przepływu występujących w obszarze dołu rozmycia. Nad stokiem wyboju, od strony umocnień, prędkość przy dnie ma wartość ujemną (rys. 6a). Występuje tam obszar wstecznego przepływu, który bardziej uwidocznił się na modelu fizycznym. W pionie zlokalizowanym na końcu umocnień (rys. 6b) widoczne są zwiększone wartości prędkości w dolnej części strumienia, zarówno pomierzone, jak i obliczone. Uzyskano rozkład prędkości typowy dla strumienia za odskokiem hydraulicznym, z przemieszczającym się w pobliżu dna strumieniem tranzytowym [Wu i Rajaratnam 1996]. W miejscu występowania maksymalnej głębokości wyboju  $h_{rmax}$  (rys. 6c) kształt rozkładu podobny jest do tachoidy typowej dla przepływu w korycie naturalnym: najmniejsza wartość prędkości występuje przy dnie, a maksymalna w odległości około  $0,8(h_{rmax} + h)$  od dna.

#### PODSUMOWANIE

Program CFD Fluent wykorzystano do prognozowania prędkości turbulentnych w dolnym stanowisku jazu, zarówno dla warunków początkowych tworzenia się rozmyć, jak i w ukształtowanym wyboju. Na podstawie zestawienia wartości obliczonych programem z wynikami uzyskanymi na modelu fizycznym stwierdzono, że właściwości programu CFD Fluent umożliwiają modelowanie przepływu turbulentnego. Uzyskane wyniki obliczeń numerycznych wykazały dużą zgodność z pomiarami laboratoryjnymi, szczególnie w przypadku rozkładu prędkości w pionie.

Z dostępnych w programie pięciu modeli dla przepływów turbulentnych największą zgodność wyników pomiarów i obliczeń uzyskano dla modelu  $k-\varepsilon$  standard.

*Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2005–2007 jako projekt badawczy.*

#### BIBLIOGRAFIA

- Błażejowski R. *Wstęp do badań empirycznych*. Wydawnictwo Akademii Rolniczej w Poznaniu, Poznań 1999.
- Błażejowski R., Zawadzki P. *Local scour in non-uniform bed material below a horizontal solid apron*. Arch. of Hydro-Engin. and Environmental Mech. Vol. 48, no. 1, 2001.
- Čertousov M. D. *Gidravlika - specjalnyj kurs*. Gosudarstvennoje Energetičeskoje Izdatelstwo, Moskwa–Leningrad 1962.



- Dąbkowski Sz. L., Skibiński J., Żbikowski A. *Hydrauliczne podstawy projektów wodnomelioracyjnych*. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa 1982.
- Dąbkowski Sz. L., Urbański J. *Intensywność turbulencji strumienia za odskokiem hydraulicznym*, Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska, Zeszyt 1 (28), Wyd. SGGW 2004.
- Fluent 6.0 User' Guide*. Fluent Inc. 2001.
- Kališ J., *Diminution de la turbulence derriere le ressaut*. Rapport 111 IX Congres de IAHR, Dubrownik 1961.
- Kiselev P. G., *Spravočnik po gidravličeskim rasčeta*m, Energia, Moskva 1974.
- Popova K. S., *Issledowanie kinematičeskoj struktury potoka na risbermie i v jame razmyva za vodoslivnymi plotinami na niesviaznyh gruntach*. Izvestia VNIIG, 1970, t. 94.
- Popova K. S. *Rasčet izmenenia głubiny mestnyh razmyvov za plotinami vo vremeni*, Izvestia VNIIG, 1985, t. 119.
- Rajaratnam N. *Turbulent jet*. Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, The Netherlands 1976.
- Rajaratnam N., Berry B. *Erosion by circular turbulent wall-jet*. J. Hydr. Res. 15(3), 1977.
- Rosiński K., I., *Hydraulic of scouring pits*. Chapter 2 z Problems of river runoff control, Acad. Sci. USSR. Section for Scientific Study of Water Engineering Problems 1961.
- Urbański J. *Mechanizm tworzenia się rozmyć za jazem w świetle eksperymentalnych badań modelowych*. Rozprawa doktorska. Wydział Inżynierii i Kształtowania Środowiska, SGGW, Warszawa 2003.
- Urbański J. *Związek charakterystyk turbulencji strumienia z głębokością rozmycia za jazem*, Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych, Zeszyt 506, Kształtowanie Środowiska, 2005.
- Wu S., Rajaratnam N. *Transition from hydraulic jump to open channel flow*. Journal of Hydraulic Engineering. Vol. 122, No 9, 1996.

Dr inż. Janusz Urbański, dr inż. Piotr Siwicki,  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego  
Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska  
02-787 Warszawa  
ul. Nowoursynowska 166  
tel.: (0 22) 59-35-290, 59-35-293  
e-mail: janusz\_urbanski@sggw.pl, piotr\_siwicki@sggw.pl

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