

Artur Magnuszewski*, Małgorzata Gutry-Korycka**

PRZEPIY WIELKICH WÓD WISŁY WE WSPÓLCZESNYM KORYCIE

Flood waters flow in the contemporary Vistula River channel

Abstract. With the use of two-dimensional hydrodynamic model *CCHE2D* it has been calculated a flood passage through the contemporary Vistula River channel in Warsaw. The channel reach is between km 501–521 and limited by flood protective dikes. For the model calibration it has been used a measurement of water surface of the 1997 year flood. To study the floodplain high vegetation influence on the river flow resistance it has been calculated two scenarios of flood passage. Scenario zero of recently existing vegetation and scenario one of tall trees clearance at the right bank between km 509–519. Simulations have been run for the discharges $Q_{p1\%} = 6430 \text{ m}^3/\text{s}$ i $Q_{p0,1\%} = 8250 \text{ m}^3/\text{s}$. Obtained results shows that the highest lowering of the water surface by 0,56 m due to trees cutting occurs at discharge $Q_{0,1\%}$ on km 510. In the river reach km 511–516 river flow has a very high average velocities in vertical, exceeding in some places 3,7 m/s. Verification of these results has been done by comparison with hydrometric measurements.

Słowa kluczowe: powódź, Wisła, Warszawa, model hydrodynamiczny *CCHE2D*
Key words: flood, Vistula, Warsaw, hydrodynamic model *CCHE2D*

WSTĘP

Dzięki budowie wałów przeciwpowodziowych i regulacji rzeki powstały szczególne warunki dla przepływu wód wielkich Wisły w Warszawie (Magnuszewski i Gutry-Korycka, 2009). Obecnie minimalizacja zagrożenia powodziowego wymaga właściwego utrzymania koryta rzecznego, odpowiedniego zagospodarowania międzywała i dbałości o stan techniczny wałów przeciwpowodziowych. Obniżenie dna koryta rzeki uregulowanego odcinkowo w celach żeglugowych doprowadziło do wytworzenia nowej równiny zalewowej, która

* e-mail: asmagnus@uw.edu.pl

** e-mail: msgutryk@uw.edu.pl

w wielu miejscach zarosła lasem łągowym. Wiele kontrowersji budzi sprawa utrzymania międzywala w stanie zapewniającym jego wysoką hydrauliczną przepustowość. Najnowsze plany zagospodarowania międzywala Wisły w Warszawie opracowane przez zespół prof. Jacka Damięckiego z Samodzielnej Pracowni Oceny i Wyceny Zasobów Przyrodniczych SGGW przewidują (jako jeden z wariantów) pozostawienie w stanie naturalnym prawego brzegu rzeki, poszerzenie koryta rzeki, odtworzenie kęp przez odcięcie ostróg i utworzenie plaży.

Pomiary na małych rzekach wykonane przez Szkutnickiego (1996) potwierdzają znaczący wpływ zanurzonej roślinności na kształtowanie się oporów przepływu wody. W przypadku dużych rzek ze względu na trudności pomiarowe podobne eksperymenty polowe są bardzo ograniczone i jako alternatywę przyjmuje się zastosowanie numerycznych modeli hydrodynamicznych. W takim podejściu klasycznym sposobem badań oddziaływania roślinności na przepływ są obliczenia, w których przyjmowane są odpowiednie wartości współczynników szorstkości.

Baptist (2004), na podstawie analizy wyników uzyskanych z różnych modeli hydrodynamicznych (od jednowymiarowych to trójwymiarowych), wskazuje na fakt, że oddziaływanie wysokiej roślinności na przepływ rzeki ma wymiar lokalny i regionalny. W wymiarze lokalnym zarastanie równin zalewowych powoduje wzrost rzędnych poziomu wody i koncentrację przepływu w korycie głównym, w wymiarze regionalnym natomiast uzyskujemy efekt zwiększonej sedymentacji i spłaszczenia fali powodziowej. Dylemat jaki musimy rozwiązać w gospodarce wodnej to odpowiedź na pytanie, który z tych wymiarów jest dla nas ważniejszy w danym miejscu. To samo dotyczy odcinka Wisły w Warszawie, zwłaszcza w kontekście toczącej się dyskusji o sposobie zagospodarowania międzywala i osiągnięcia wielu często sprzecznych funkcji rzeki np. utrzymanie głębokości żeglugowej, odtworzenie kęp z rezerwatem, przybliżenie rzeki mieszkańcom miasta, zachowanie walorów widokowych, zabezpieczenie przeciwpowodziowe i in.

Oceną wpływu zarastania lub wycinki lasu w międzywale Wisły na układ zwierciadła wód wielkich w Warszawie zajmował się zespół z Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej (IMGW), wykonując modelowanie hydrodynamiczne dla odcinka km 504,1–513,3 (Ceran i in., 2006). Zastosowano model MIKE 11, do którego wbudowany jest jednowymiarowy Moduł Hydrodynamiczny (HD). Zasada jego działania wykorzystuje zintegrowane równania Saint Venant'a oparte na prawach zachowania masy i pędu. Rozwiązanie równań opiera się na 6-punktowym schemacie Abbota – Ionesco. Geometrię koryta rzeki opisano za pomocą przekrojów poprzecznych pomierzonych w ramach projektu finansowanego przez Bank Światowy w 1997 r., a także przekrojów pomierzonych przez służby IMGW. W analizowanym odcinku rzeki dyspono-

wano 27 przekrojami. Na podstawie specjalnie wykonanych zdjęć lotniczych wyznaczono zasięg obszarów w międzywalu pokrytych drzewami i krzewami, którym przypisano współczynnik szorstkości $n=0,1$. W scenariuszu usunięcia roślinności i zastąpienia zadrzewień łąką przyjęto $n=0,035$. Obliczenia profilu podłużnego wód wielkich wykonano dla przepływów o prawdopodobieństwie przekroczenia 10%, 1%, 0,3% i 0,1%. Uzyskany wynik symulacji przepływu wód wielkich wg scenariusza wycięcia drzew w międzywalu na odcinku km 507–509 brzeg lewy, oraz km 510–511 brzeg prawy daje km 504 obniżenie rzędu 40 cm.

Obliczenia IMGW wykonano dla krótkiego odcinka rzeki za pomocą modelu jednowymiarowego. W tym opracowaniu zastosowano nowszą metodę jaką jest hydrodynamiczny model dwuwymiarowy. Analizą objęto dłuższy odcinek Wisły km 510–521, w którym oceniony został wpływ wycinki zarośli i lasu łąkowego na prawym brzegu rzeki na ukształtowanie profilu podłużnego zwierciadła wód powodziowych. Analizie poddano także rozkład prędkości przepływu, wskazując na znaczenie tego parametru przy prognozowaniu procesów korytowych i planowniu zagospodarowania rzeki.

DANE I METODA BADAŃ

Do obliczeń przepływu wód wielkich w warszawskim odcinku Wisły wykorzystano dwuwymiarowy model hydrodynamiczny *CCHE2D* opracowany w National Center for Computational Hydroscience and Engineering na Uniwersytecie stanu Mississippi w USA. Model wykorzystuje uśrednione w pionie równania Naviera-Stokesa, których rozwiązanie dostarcza danych o prędkości średniej w pionach i rzędnej poziomu wody. W modelu do rozwiązania równań zastosowano zmodyfikowaną metodę elementów skończonych, wykorzystującą technikę komórek kontrolnych. Szczegółowy opis teoretycznych założeń modelu przedstawili Altınakar i in. (2005).

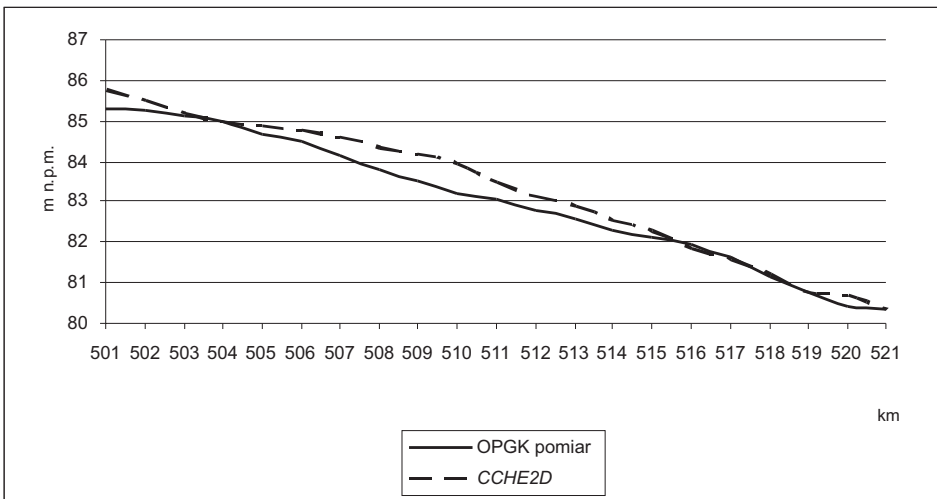
Model obejmuje odcinek łożyska rzeki ograniczony wałami przeciwpowodziowymi między km 501–521. Uzyskano siatkę nieregularnych czworoboków, o liczbie z $i=50$ linii wzdłuż osi koryta i $j=400$ linii wyznaczających przekroje poprzeczne. Odstęp linii i siatki obliczeniowej w rejonie śródmieścia Warszawy jest rzędu 20–30 m, a linii j rzędu 40–50 m. Cyfrowy model terenu o rozdzielczości 20 m liczył 78,6 tys. punktów wysokościowych, z których interpolowane zostały rzędne dna w węzłach siatki obliczeniowej modelu *CCHE2D*.

Do opisu geometrii koryta i międzywala w odcinku km 510–521 wykorzystano podzbiór cyfrowego modelu terenu, którego sposób uzyskania został opisany w pracy (Magnuszewski i Gutry Korycka, 2009). Dodatkowo po wykonaniu auto-

matycznej interpolacji wprowadzono ręcznie rzędne korony ostróg, znane z dokumentacji udostępnionej przez RZGW w Warszawie.

Górny warunek brzegowy przyjęto w postaci wartości ustalonego natężenia przepływu, a dolny warunek brzegowy jako rzędną zwierciadła wody. Wykonano obliczenia dla wielkości przepływu kulminacyjnego w lipcu 1997 r. (Q_{1997}), a także przepływów obliczonych metodami probabilistycznymi o założonym prawdopodobieństwie przekroczenia $Q_{p1\%}$ i $Q_{p0,1\%}$. W niniejszym opracowaniu przyjęto wartości natężenia przepływu $Q_{p1\%}$ i $Q_{p0,1\%}$ za IMGW (Wpływ roślinności..., 2006), przepływu kulminacyjnego z Q_{p1997} za Grelą i in. (1999). Rzędną poziomu wody w km 521 przyjęto z profili podłużnych opracowanych przez OPGK-Lublin dla 1997 r i Hydroprojekt (Koncepcja..., 1998) dla wody $Q_{p1\%}$ i $Q_{p0,1\%}$.

Na podstawie *Mapy użytkowania gruntów...*(2000) przyjęto rozkład przestrzenny i następujące wartości współczynników szorstkości: koryto Wisły – 0,025, grunty orne – 0,040, łąki i zieleń miejska – 0,045, nieużytki, ogródki działkowe – 0,055, lasy – 0,120. Przy doborze współczynników szorstkości korzystano z ogólnie dostępnych tablic i wcześniejszych doświadczeń zebranych w pracy Soczyńska i in. (2003). Przyjęte wartości współczynników szorstkości porównano z opracowaniem wykonanym dla równin zalewowych z gęstą pokrywą roślinną (Arcement i Schneider, 1989).



Rys. 1. Profil podłużny zwierciadła wody Wisły w Warszawie przy przepływie $4170 \text{ m}^3/\text{s}$ w 1997 r. uzyskany z pomiaru niwelacyjnego OPGK i z obliczeń za pomocą modelu *CCHE2D*

Fig. 1. Longitudinal profile of the Vistula river water level at Warsaw at the discharge of $4170 \text{ m}^3/\text{s}$ in 1997 obtained from the OPGK leveling measurement and from computations with *CCHE2D* model

Przyjęto krok czasowy obliczeń równy 1 s, a całkowity czas symulacji 80 000 s, zajmował przeciętnie 20–24 godziny, przy wykorzystaniu stacji roboczej z procesorem Xeon.

W celu kalibracji modelu wykonano obliczenia dla przypadku przepływu wezbraniowego z 1997 r., jako górny warunek brzegowy przyjęto przepływ ustalony, a jako dolny rzędną poziomą wody w km 521 z profilu podłużnego zmierzonego przez OPGK-Lublin. Uzyskano dobrą zgodność obliczonego i zmierzonego profilu podłużnego powierzchni wody Wisły w analizowanym odcinku (rys. 1).

W celu ustalenia wpływu prac porządkowych w międzywalu na kształtowanie się rzędnych wód wielkich wykonano obliczenia wg scenariusza obecnego pokrycia terenu i scenariusza wycinki lasu łęgowego między km 509–519 na brzegu prawym. Ten wariant obliczeniowy wykonano zastępując wartości współczynnika szorstkości 0,120 przyjęte dla obszaru lasu łęgowego, wartością współczynnika szorstkości równą 0,045 charakteryzującą łąki i zieleni miejską. Obliczenia wykonano dla przepływu wód o prawdopodobieństwie $Q_{p1\%}$ i $Q_{p0,1\%}$ (tab. 1).

Tab. 1. Wartości natężenia przepływu Q Wisły w profilu Port Praski i rzędnych poziomu zwierciadła wody z w km 521 przyjęte jako warunki brzegowe w modelu hydrodynamicznym *CCHE2D*

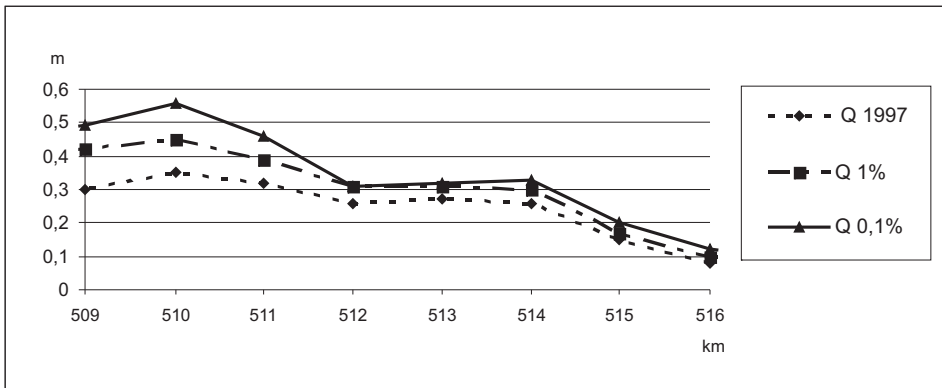
Tab. 1. Values of the discharge intensity Q of the Vistula river in the Port Praski profile and the ordinates of the water level at the km 521, used as boundary conditions in the *CCHE2D* hydrodynamic model

Przepływ charakterystyczny	1997	$Q_{p1\%}$	$Q_{p0,1\%}$
Q (m ³ /s)	4170	6430	8250
z (m n.p.m.)	80,35	82,32	83,3

WYNIKI

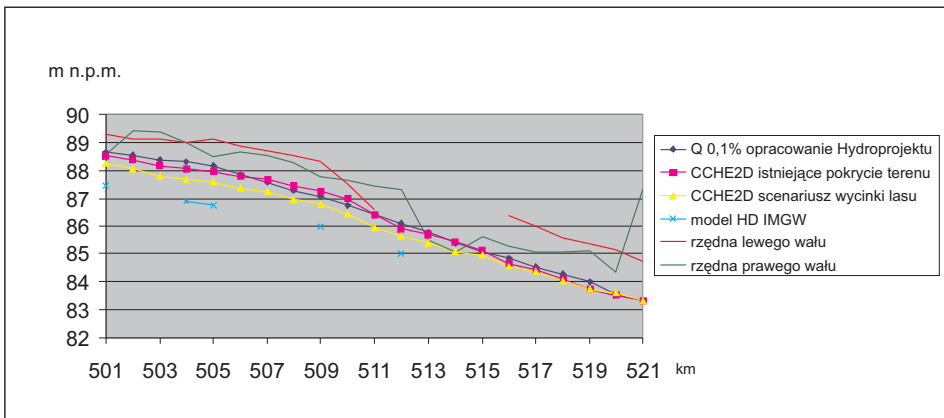
Z analizy profilu obliczonego za pomocą modelu *CCHE2D* (rys. 1) wynika, że największa różnica w stosunku do profilu zmierzonego pojawia się w km 510 biegu rzeki. To zjawisko można wytłumaczyć hydraulicznym spiętrzeniem wody wywołanym gwałtownym zmniejszeniem przekroju poprzecznego w tzw. gorsocie warszawskim, który w przypadku wód wielkich wynika z rozstawu wałów przeciwpowodziowych.

Na rys. 2 porównano wartość obniżenia rzędnych poziomu wód wielkich w profilu podłużnym w wyniku wycinki drzew przy przepływie z 1997 r., $Q_{1\%}$, $Q_{0,1\%}$. Uzyskane wyniki wskazują, że największy efekt w postaci obniżenia



Rys. 2. Obniżenie poziomu zwierciadła wód wielkich Wisły w odcinku km 509–516 wg scenariusza wycinki drzew w obrębie prawego brzegu tarasu zalewowego

Fig. 2. Lowering of the high-water level of the Vistula river along the km 509-516 segment in the case of the scenario with tree clearance within the right-hand edge of the floodplain

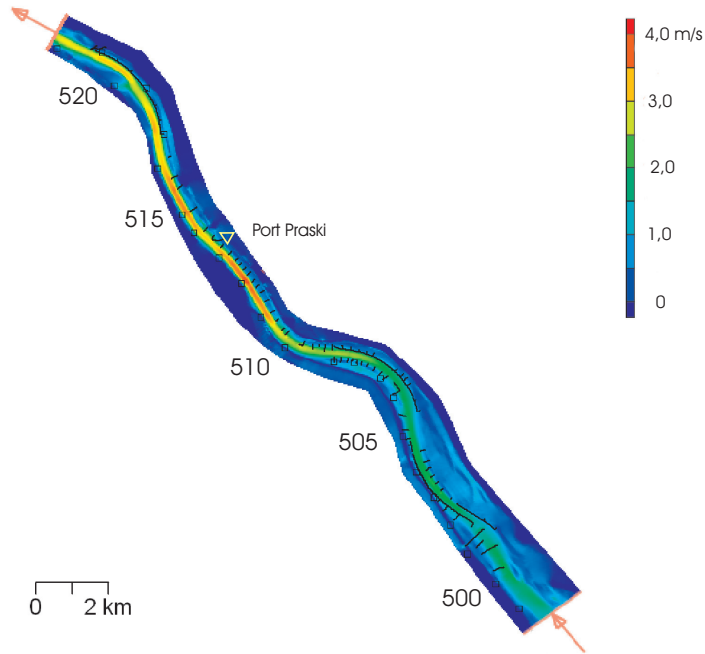


Rys. 3. Profil podłużny zwierciadła wody Wisły w Warszawie przy przepływie $Q_{p,0.1\%} = 8250 \text{ m}^3/\text{s}$ przy różnych scenariuszach zagospodarowania międzywała

Fig. 3. Longitudinal profile of the Vistula river water level at Warsaw at the discharge of $Q_{p,0.1\%} = 8250 \text{ m}^3/\text{s}$, when the space between the flood walls is managed according to various scenarios

o 0,56 m rzędnej poziomu wielkiej wody występuje przy przepływie $Q_{p,0.1\%}$ na km 510. Jest to bardzo wrażliwa strefa ze względu na bezpieczeństwo wałów na lewym brzegu w rejonie Czerniakowa. Swoistym przypomnieniem o rzeczywistości takiej awarii jest zasięg powodzi z 1934 r., która objęła swym zasięgiem na lewym brzegu Czerniaków i Wilanów.

Na rys. 3 pokazano układ powierzchni wody przy przepływie $Q_{p,0.1\%}$ oraz rzędne korony wałów, dla porównania zaznaczono także poziom wody uzyska-



Rys. 4. Pole prędkości przepływu przy $Q_{0,1\%} = 8250 \text{ m}^3/\text{s}$ w odcinku km 501–521 Wisły w Warszawie w warunkach istniejącego pokrycia terenu

Fig. 4. Velocity field at discharge $Q_{0,1\%} = 8250 \text{ m}^3/\text{s}$ in a km 501–521 reach of the Vistula River in Warsaw in existing land cover conditions

ny przez Ceran i in. (2006) za pomocą jednowymiarowego modelu HD, przy nieco innych założeniach obliczeniowych.

Dzięki zabiegowi uporządkowania międzywala na odcinku prawego brzegu w km 513–514 można uzyskać obniżenie poziomu wody wielkiej $Q_{p0,1\%}$ do rzędnej korony istniejącego wału. Jest to fragment uznawany za niedostatecznie chroniony, w którym planowane jest podwyższenie wału. Zachowanie istniejącego pokrycia terenu w międzywale przy przejściu wody $Q_{p0,1\%}$ doprowadzi do przekroczenia rzędnej korony wału w tym odcinku o 0,20 m.

Uzyskane wyniki modelowania przepływu wód wielkich wskazują na istnienie bardzo dużych prędkości przepływu w wąskim odcinku koryta Wisły w km 511–516 (rys. 4). Prędkości średnie w pionie w niektórych miejscach przekraczają 3,7 m/s. Jest to prędkość nie spotykana na nizinnych rzekach, dlatego wykonano weryfikację poprawności pracy modelu przez porównanie prędkości średnich w pionie obliczonych i zmierzonych młynkiem hydrometrycznym w czasie dwu pomiarów w dniach 2006 IV 04 i 2006 VI 10, wykonanych przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej. Pomiaru wykonywano z Mo-

stu Świętokrzyskiego młynkiem hydrometrycznym, co umożliwia obliczanie prędkości średnich w pionie. Porównanie największej zmierzonej prędkości średniej w pionie z prędkością obliczoną w tym miejscu (odległość od brzegu lewego) przez model *CCHE2D* zawiera tab. 2. Uzyskano dobrą zgodność prędkości średnich w pionie, przy przepływie 4356 i 3059 m³/s. Na uwagę zasługuje także największa prędkość punktowa – jaką zmierzono młynkiem przy przepływie 4356 m³/s – 3,38 m/s, a także prędkość średnia w przekroju – 2,1 m/s.

Tab. 2. Porównanie wybranych parametrów natężenia przepływu uzyskanych z pomiaru hydrometrycznego IMGW w profilu Mostu Świętokrzyskiego i obliczonych za pomocą modelu *CCHE2D*

Tab. 2. Comparison of selected parameters of flow intensity obtained from hydrometric measurements in the Świętokrzyski Bridge profile and calculated from the *CCHE2D* model

Data pomiaru	Q (m ³ /s)	H (cm)	Maksymalna prędkość średnia w pionie v _h (m/s) w profilu hydrometrycznym		Rzędna poziomu wody w profilu wodowskazowym (m)	
			zmierzona	obliczona	zmierzona	obliczona
2006 IV 04	4356	625	2,69	2,79	82,33	82,69
2006 VI 10	3059	576	2,15	2,36	81,84	82,03

WNIOSKI

Rozwój Warszawy doprowadził na przestrzeni od końca XIX w. do lat 60. XX w. do znacznego zwężenia koryta i równin zalewowych Wisły. W wyniku koncentracji nurtu przez budowle regulacyjne nastąpiło wprawdzie obniżenie dna koryta rzeki sięgające 2 m, jednak niekorzystne jest zwężenie rozstawu wałów przeciwpowodziowych. W przypadku przejścia wód wielkich to właśnie wały przeciwpowodziowe są ograniczeniem, a powierzchnie przekrojów poprzecznych międzywała wyznaczają rzędne poziomu wód wielkich. W południowej części miasta doszło do znacznych zmian układu koryta Wisły, od roztokowego do uregulowanego. Obecne wały przeciwpowodziowe na Czerniakowie i Saskiej Kępie odcięły dawne ramiona rzeki i starorzeczca, Są to istniejące obszary silnie zurbanizowane, jednak nadal pozostają obszarami zalewowymi. Współcześnie zabezpieczenia przeciwpowodziowe dają ochronę przed przejściem wód wielkich przez miasto, jednak przy planowaniu przestrzennym dawnych równin zlewowch i zagospodarowaniu międzywała należy brać pod uwagę ryzyko powodziowe. Ogromnego znaczenia wobec podwyższenia rzędnych zwierciadła wód wielkich w międzywałiu nabiera jego właściwe zagospodarowanie. Jednym ze

sposobów zwiększenia bezpieczeństwa powodziowego Warszawy, w rejonie prawego brzegu km 513–514 jest podwyższenie korony wału, bez potrzeby radykalnej wycinki lasu w międzywałach.

Kompromisowym rozwiązaniem proponowanym przez Hydroprojekt (Koncepcja...1998) jest uformowanie przekrojów poprzecznych w taki sposób, że pozostawia się wysokie drzewa przy podstawie wałów, a niska roślinność zajmuje obszar przykorytowej równiny zalewowej. Przy postępującej poprawie jakości wody w Wiśle rosnać będzie zainteresowanie mieszkańców miasta spędzaniem latem wolnego czasu na nadrzecznych plażach, które mogą być elementem przekroju poprzecznego międzywał w odcinku tzw. gorsetu warszawskiego.

Na szczególną uwagę zasługuje bardzo duża prędkość przepływu wód wielkich przez odcinek km 511–516. Ochronie podlegać musi podstawa wałów przeciwpowodziowych, co wyklucza proponowany przez zespół prof. Jacka Damięckiego wariant zagospodarowania prawego brzegu Wisły przez odcięcie ostróg i utworzenie wysp.

Badania nad dynamiką przepływu wód wielkich w Warszawie powinny być kontynuowane w większej skali, do czego potrzebne są szczegółowe dane o morfometrii koryta i zabudowie hydrotechnicznej (także geometrii podpór mostów). Niezbędne jest także sformułowanie priorytetów w zagospodarowaniu Wisły w Warszawie, niektóre założenia są bowiem sprzeczne, np. renaturyzacja koryta przez likwidację budowli regulacyjnych nie poprawi warunków żeglugowych. Odcięcie ostróg i utworzenie drugiego koryta pod prawym brzegiem, kłóci się z poprawą bezpieczeństwa powodziowego, bowiem niesie ryzyko rozmycia podstawy wałów przeciwpowodziowych w warunkach przejścia wód wielkich.

PODZIĘKOWANIA

Autorzy składają podziękowania dyr. Annie Michna z Regionalnego Zarządu Gospodarki Wodnej w Warszawie za udostępnienie danych dotyczących Wisły w Warszawie. Dziękujemy także prof. Mustafie Altınakarowi z University of Mississippi w Oxford, za możliwość wykorzystania modelu *CCHE2D* do obliczeń parametrów hydraulicznych koryta rzeki. Dziękujemy dr Bogdanowi Zielińskiemu i dr Jerzemu Szkutnickiemu z Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej za konsultacje w zakresie wyników pomiarów hydrometrycznych w Warszawie.

Literatura

Altınakar M.S., Czernuszenko W., Rowiński P., Wang S.Y. (red.), 2005, Computational Modeling for the Development of Sustainable Water Resources Systems in Poland. *Publ. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc.* E-5 (387), 239–260.

- Arcement G.J., Schneider V.R., 1989, Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains. *United States Geological Survey Water-supply Paper 2339* USGS.
- Baptist M.J., 2004, A commentary on advances in modelling the effects of vegetation on flow, sediment transport and morphology. [w:] Petts G., Kennedy B. (red.) *Emerging concepts for integrating human and environmental water needs in river basin management*. Report of a workshop sponsored by the USACE as part of the Water Operations and Technical Support Programme, September 16 –18, The University of Birmingham, United Kingdom, 72–76.
- Ceran M., Sasim M., Kadłubowski A., Pliźga M., 2006, Wpływ roślinności porastającej międzywale rzeki Wisły w rejonie Warszawy na odcinku od km 504,1 do km 513,3 na zagrożenia powodziowe. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa, (maszynopis).
- Grela J., Słota H., Zieliński J., 1999, *Dorzecze Wisły. Monografia powodzi lipiec 1997*. IMGW, Warszawa.
- Koncepcja Programowo Przestrzenna Zagospodarowania Doliny i Regulacji Wisły od km 295,2 do km 684,0: Odcinek warszawski od ujścia Pilicy do ujścia Narwi od km 456,8 do km 550,9, 1998, Tom I: Zagadnienia przeciwpowodziowe. Hydroprojekt Warszawa Sp. z o.o.
- Magnuszewski A., Gutry-Korycka M., 2009, *Rekonstrukcja przepływu wielkich wód Wisły w Warszawie w warunkach naturalnych*. WGSR UW, Warszawa, Prace i Studia Geograficzne t. 43, 141–151.
- Soczyńska U., Jełowicki J., Nowicka B., Magnuszewski A., Kobyłecki P., 2003, Modelowanie zasięgu zalewów wezbraniowych. [w:] Gutry-Korycka M., Nowicka B., Soczyńska U. (red.) *Rola retencji zlewni w kształtowaniu wezbrań opadowych*. WGSR UW, Warszawa, 134–152.
- Szcutnicki J., 1996, Ocena szorstkości koryt rzecznych na podstawie badań eksperymentalnych. *Materiały Badawcze. Seria Hydrologia i Oceanologia* – 19, IMGW, Warszawa.