

## NUMERYCZNE MODELOWANIE HYDRODYNAMIKI JAKO NARZĘDZIE WSPOMAGANIA PROJEKTOWANIA REKREACYJNYCH I SPORTOWYCH OBIEKTÓW WODNYCH

Michał Szydłowski

Politechnika Gdańska

**Streszczenie.** W artykule opisano zastosowanie obliczeń numerycznych w procesie projektowania, analizy działania oraz oceny bezpieczeństwa użytkowania wodnych obiektów rekreacyjnych i sportowych. Użytkownicy aquaparków, sportowcy, a szczególnie kibice, oczekują wyjątkowych doznań na obiektach wodnych z jednoczesną gwarancją bezpieczeństwa. Na te kwestie duży wpływ ma hydrodynamika przepływu. Aby właściwie dobrać parametry geometryczne i hydrauliczne charakteryzujące projektowany obiekt, taki jak zjeżdżalnia wodna czy tor kajakarstwa górskiego, należy przeanalizować strukturę strumienia przemieszczającej się w nim wody. Przewidywanie miejsc występowania lokalnych zjawisk hydraulicznych, jak i dokładne oszacowanie głębokości i prędkości strumienia wody są niezbędne do prawidłowego zaprojektowania konfiguracji każdego toru wodnego. W artykule zaproponowano wykorzystanie w tym celu obliczeń numerycznych, a jako matematyczny model przepływu wody wybrano równania wody płytkiej. W celu rozwiązania równań zastosowano metodę objętości skończonych. Jako przykłady zastosowania numerycznej analizy przepływu wody przedstawiono symulacje przepływu na zjeżdżalni wodnej typu „dzika rzeka” w Sopocie i na torze kajakarstwa górskiego w Drzewicy. Uzyskane wyniki symulacji przepływu wydają się wiarygodne, co upoważnia do polecenia tego typu podejścia projektantom atrakcji wodnych – jest to główny wniosek wynikający z pracy.

**Słowa kluczowe:** modelowanie matematyczne, hydrodynamika, hydrotechnika, rekreacja, sport, bezpieczeństwo, projektowanie

---

Adres do korespondencji – Corresponding author: dr hab. inż. Michał Szydłowski, prof. nadzw. PG, Katedra Hydrotechniki, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk; e-mail: [michal.szydowski@wilis.pg.gda.pl](mailto:michal.szydowski@wilis.pg.gda.pl).

© Copyright by Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, Kraków 2016

## WSTĘP

Numeryczne symulacje przepływu wody są w ostatnich latach jednym z podstawowych sposobów wspomagania projektowania oraz analizy pracy infrastruktury sanitarnej, wodnej i przeciwpowodziowej, jak również elementów zabudowy hydrotechnicznej naturalnych i sztucznych przewodów tranzytu wody. Potwierdzeniem tego są liczne aplikacje modeli matematycznych wykorzystywane do analizy przepływów w rzekach, jeziorach, sztucznych kanałach otwartych i zbiornikach wodnych. Ten klasyczny sposób wykorzystywania modeli hydrodynamicznych ma w hydrologii, ekohydraulice czy gospodarce wodnej długą, dobrze osadzoną tradycję i stanowi w inżynierii wodnej kanon wiedzy. Jednakże symulacje numeryczne przepływu wody mogą być również bardzo przydatne w procesie projektowania różnego rodzaju niestandardowych wodnych instalacji rekreacyjnych i sportowych, takich jak zjeżdżalnie wodne czy tory kajakarstwa górskiego.

Aktywne spędzanie wolnego czasu przez ludzi, również w Polsce, jest coraz bardziej popularne i powszechne. Wodne parki rozrywki są obecnie jednym z najpopularniejszych miejsc rekreacji. Wciąż powstają nowe obiekty, a istniejące są modernizowane i wyposażane w nowe atrakcje. Użytkownicy oczekują intensywnych wrażeń, a jednocześnie potrzebują gwarancji bezpieczeństwa, stąd wyzwaniem dla projektantów jest uzyskanie kompromisu pomiędzy atrakcyjnością a bezpieczeństwem użytkownika obiektu. Podobnie jest w przypadku sportów wodnych, takich jak kajakarstwo górskie czy rafting. Tu także o atrakcyjności obiektu wodnego zarówno dla uczestnika spływu, sportowca, jak też kibica decyduje ilość wydzielanej adrenaliny, będąca funkcją doznań i emocji pojawiających się w trakcie przemieszczenia się wzdłuż toru wodnego. Ponownie wymaga to od projektantów zaplanowania odpowiedniej atrakcyjności tego typu obiektów z jednoczesnym zapewnieniem bezpieczeństwa ich użytkowania. Na wymienione cechy wpływ ma głównie hydrodynamika przepływu wynikająca z geometrii obiektu i sposobu jego zasilania w wodę. Aby właściwie dobrać parametry geometryczne i hydrauliczne charakteryzujące projektowany tor, należy szczegółowo przeanalizować strukturę strumienia przemieszczającej się wody. Badany przepływ wody przez rynnę zjeżdżalni wodnych czy koryta torów kajakarstwa górskiego jest zazwyczaj szybkozmienny, co wiąże się z występowaniem jednocześnie w różnych częściach obiektu ruchu spokojnego i rwącego. Oznacza to, że w strukturze przepływu będą pojawiać się różnego rodzaju lokalne zjawiska hydrauliczne, takie jak odskoki hydrauliczne, ruchome i stacjonarne spiętrzenia i depresje zwierciadła wody, bystrza, zawirowania i strefy martwe. Właściwe przewidywanie lokalizacji tych zjawisk hydraulicznych oraz dokładne oszacowanie głębokości i prędkości ruchu wody są niezbędne do prawidłowego zaprojektowania konfiguracji każdego toru wodnego [Goodman i Parr 1994].

Do niedawna badania przepływu wody w obiektach stosunkowo złożonych, jakimi są tory zjeżdżalni wodnych i kajakarstwa górskiego, były możliwe głównie dzięki modelowaniu fizycznemu [Burzyński i Szydłowski 2002], bądź obserwacji istniejących budowli. Obecnie można wspomagać się w tym zakresie problemów symulacjami numerycznymi hydrodynamiki. Często w tym celu stosuje się złożone, trójwymiarowe modele CFD dostępne w komercyjnych systemach symulacyjnych, takich jak ANSYS – FLUENT [Pollert i in. 2015]. Jednak możliwe jest również wykorzystanie modeli prostszych. Taką próbę zastosowania uproszczonego modelu dwuwymiarowego opisano w tym artykule na przykładzie symulacji przepływów na zjeżdżalni typu „dzika rzeka” użytkowanej w parku

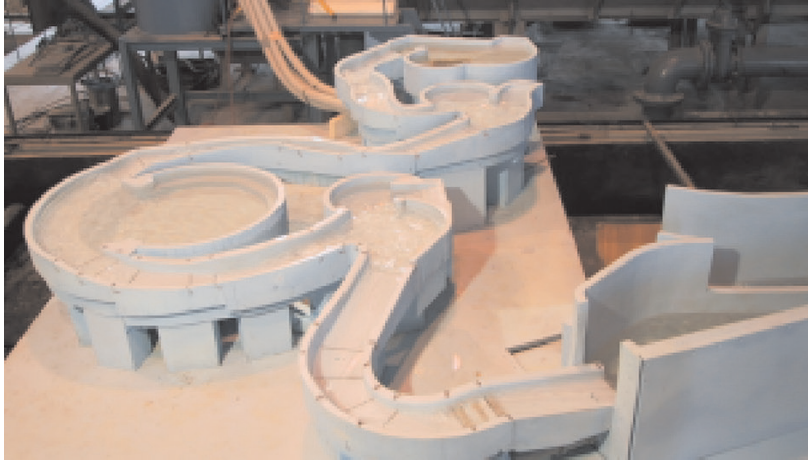
wodnym w Sopocie oraz na torze kajakowym w Drzewicy. Celem pracy było sprawdzenie, czy stosując model przepływu płaskiego i wolnozmiennego oraz odpowiednią metodę jego rozwiązania, można uzyskać wiarygodne wyniki w przypadku szybkozmiennego przepływu w opisanych korytach. Przedstawione w pracy obliczenia zostały wykonane w Katedrze Hydrotechniki, Wydziału Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej i są elementem szerszych badań nad hydraulicznymi aspektami projektowania rekreacyjnych i sportowych obiektów wodnych [Szydłowski i Otta 2014, Siedlecka i Szydłowski 2016].

## CHARAKTERYSTYKA ANALIZOWANYCH OBIEKTÓW WODNYCH

W pracy przedstawiono wybrane wyniki numerycznej analizy przepływu wody w dwóch obiektach wodnych o różnym przeznaczeniu. Pierwszy z nich stanowi przykład rekreacyjnej zjeżdżalni wodnej typu „dzika rzeka”. Tego rodzaju tory wodne znacząco różnią się od klasycznych zjeżdżalni wodnych o kołowych czy półkolistych przekrojach poprzecznych, najczęściej wykorzystywanych w parkach wodnych. Na klasycznej zjeżdżalni wodnej użytkownik ześlizguje się pod wpływem siły ciężkości, a woda służy jedynie do wytworzenia cienkiej warstwy pokrywającej powierzchnię ślizgu w celu zmniejszenia tarcia między użytkownikiem a zjeżdżalnią. Uzyskiwane na takim torze wrażenia związane są z przyspieszeniami i siłami działającymi na użytkownika, a te zależą m.in. od spadku rynny, liczby zakrętów, ich promieni oraz kombinacji tych elementów [Szczepaniak 2009]. Osoba korzystająca z obiektu typu „dzika rzeka”, inaczej niż na klasycznej zjeżdżalni, nie jest poddana dużym przeciążeniom ani przyspieszeniom wynikającym z siły grawitacji oddziałującej na masę człowieka. Na ruch osoby zanurzonej (niekiedy częściowo) w wodzie, wpływa przede wszystkim strumień płynącej wody. Dynamika przepływu jest determinowana głównie geometrią koryta. Kształt koryta i jego spadek podłużny wpływają na rodzaj przepływu wody w nim zachodzący i występujące zjawiska hydrauliczne. Ogólny schemat toru wodnego przykładowej „dzikiej rzeki” przedstawiono na ryc. 1, zawierającej widok na fizyczny model obiektu, wykonany w 2002 roku w czasie budowy parku wodnego w Sopocie w celu prowadzenia laboratoryjnych badań hydraulicznych tej instalacji [Burzyński i Szydłowski 2002].

W przypadku obiektu rzeczywistego, pomijając zbiorniki zasilający i odpływowy, zasadniczy tor zjazdowy tworzą cztery odcinki kanałów otwartych o szerokości zmiennej od 1 do 2 m, łącząc trzy baseny spoczynkowe. Długość naturalnego toru zjazdowego wzdłuż jego osi wynosi 72 m, a deniwelacja trasy 4,3 m, co daje średnio 6% spadku podłużnego dna kanałów. Obiekt w założeniach projektowych pracuje w zamkniętym obiegu wodnym ze stałym wydatkiem eksploatacyjnym zawartym w przedziale 0,60 do 0,85 m<sup>3</sup> · s<sup>-1</sup>.

Drugim przykładem analizowanego obiektu wodnego jest sportowy tor kajakarstwa górskiego w Drzewicy [Szydłowski i Otta 2014]. Jest to sztuczny tor zlokalizowany poniżej zbiornika retencyjnego na rzece Drzewiczce, stanowiącej lewobrzeżny dopływ Pilicy. Został on oddany do użytku w 2005 roku. Obiekt ten jest pierwszym torem kajakowym w Polsce i jednym z nielicznych w Europie zlokalizowanym na terenach nizinnych. Spełnia on wszelkie normy dotyczące organizacji zawodów rangi międzynarodowej. Ukształtowanie rynny toru powoduje, że jest on bardzo dynamiczny i trudny, a także wymagający od zawodników wysokich umiejętności technicznych. Ogólny widok na rzeczywisty obiekt zaprezentowano na ryc. 2.



Ryc. 1. Model zjeżdżalni wodnej typu „dzika rzeka” w parku wodnym w Sopocie  
 Fig. 1. Model of the „wild river” water slide in water park in Sopot (Poland)



Ryc. 2. Widok na tor kajakarstwa górskiego w Drzewicy  
 Fig. 2. View of the canoeing white water course in Drzewica (Poland)

Tor ma budowę przepływową i działa w systemie grawitacyjnym. Zasilenie rynny w wodę odbywa się za pomocą jazu będącego elementem zapory wodnej. Zawodnicy do startu przygotowują się na zbiorniku retencyjnym, skąd wpływają bezpośrednio na trasę slalomu. Rynną toru stanowi wybetonowane koryto o przekroju trapezowym, w którym nachylenie ścianek wynosi  $60^\circ$ . Długość toru wynosi 194 m, a jego szerokość waha się w granicach od 5 m do 12 m. Podłużny spadek dna różni się na dwóch sekcjach toru – na odcinku górnym wynosi 1,89%, natomiast na dolnym 1,4%. Różnica poziomów zwierciadła wody pomiędzy przekrojem startowym a metą wynosi 4 m. Budowla

zasilana jest ze średnim wydatkiem  $8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Przepływ zależy od pojemności warstwy użytkowej zbiornika skąd czerpana jest woda. Obiekt został wyposażony w system mobilnych przeszkód, co umożliwi wytworzenie wielu kombinacji struktur przepływu wody w korycie toru.

Ze względu na rekreacyjne i sportowe przeznaczenie opisanych torów wodnych, przepływ wody w nich występujący jest hydraulicznie bardzo urozmaicony. Mimo, że jest on ustalony (trwały w czasie), to jednocześnie charakteryzuje się znacznymi zmianami kierunku przepływu, a także znaczną zmiennością przestrzenną parametrów ruchu, co nadaje mu charakter niejednostajny i szybkozmienny. Ruch wody w rynnach torów odbywa się zarówno w reżimie rwącym, jak i spokojnym. Tym formom przepływu towarzyszą nieciągłości parametrów przepływu, którymi są przede wszystkim odskoki hydrauliczne oraz różne formy spiętrzeń i depresji zwierciadła. Zasadniczymi zjawiskami towarzyszącymi przepływowi rwącemu są również sąsiadujące ze sobą strefy dyfrakcji i interferencji spiętrzeń i depresji zwierciadła wody. Jednocześnie w badaniu przepływu na analizowanych torach, ze względu na ich kształt wyłania się potrzeba analizy ruchu w więcej niż jednym kierunku. Duże spadki podłużne jak i poprzeczne oraz obecność różnego typu przeszkód wskazują na konieczność traktowania przepływu jako co najmniej dwuwymiarowego w układzie płaskim. Podsumowując, można stwierdzić, że w badaniach hydraulicznych obu opisanych rodzajów obiektów wodnych niezbędna jest symulacja przepływu dwuwymiarowego o charakterze szybkozmiennym z występującymi nieciągłościami. W tym celu wykorzystano równania przepływu wody płytkiej [Sawicki 1998].

## MATEMATYCZNY MODEL HYDRODYNAMICZNY

Jednym z najczęściej stosowanych w inżynierii wodnej matematycznym modelem jednowymiarowego przepływu wody ze swobodną powierzchnią są równania de Saint-Venanta [Abbott 1979]. Ich dwuwymiarowym odpowiednikiem są tzw. równania wody płytkiej. Oba modele (układy równań) można wyprowadzić, stosując stosowne uśrednianie, z równań Naviera-Stokesa [Sawicki 1998]. W przypadku dwuwymiarowym, po pominięciu dyssypacji pędu będącej efektem burzliwości, a także dyspersji pędu będącej efektem uśredniania prędkości, zachowawcza postać równań nieustalonego przepływu wody jest następująca:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} + \mathbf{S} = \mathbf{0}, \quad (1)$$

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} h \\ uh \\ vh \end{pmatrix}, \quad \mathbf{E} = \begin{pmatrix} uh \\ u^2h + 0,5gh^2 \\ uvh \end{pmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{pmatrix} vh \\ uvh \\ v^2h + 0,5gh^2 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{S} = \begin{pmatrix} 0 \\ -gh(S_{ox} - S_{fx}) \\ -gh(S_{oy} - S_{fy}) \end{pmatrix}. \quad (2)$$



gdzie:

- $x$  i  $y$  – zmienne przestrzenne, m,
- $t$  – czas, s,
- $g$  – przyspieszenie ziemskie,  $m^2 \cdot s^{-1}$ ,
- $h$  – głębokość, m,
- $u$  i  $v$  – uśrednione wzdłuż głębokości składowe wektora prędkości,  $m \cdot s^{-1}$ ,
- $S_o$  – spadek dna
- $S_f$  – spadek linii energii.

Stosując do oszacowania wartości naprężeń stycznych na dnie formułę Manninga [Sawicki 1998], spadki hydrauliczne, odpowiednio w kierunku  $x$  i  $y$ , można przedstawić jako:

$$S_{fx} = \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}}, \quad S_{fy} = \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (3)$$

Układ (1) można zapisać też w nieco innej postaci wektorowej:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \text{div } \mathbf{F} + \mathbf{S} = \mathbf{0} \quad (3)$$

gdzie:

$\mathbf{F}$  – suma wektorów strumieni masy i pędu  $\mathbf{E}$  i  $\mathbf{G}$  (2), którą można zapisać jako:

$$\mathbf{F} \mathbf{n} = \mathbf{E} n_x + \mathbf{G} n_y \quad (4)$$

gdzie:

- $\mathbf{F} \mathbf{n}$  – strumień masy i pędu,
- $n_x$  i  $n_y$  – składowe wektora jednostkowego odpowiednio w kierunku  $x$  i  $y$ .

Układ równań (1) jest układem równań różniczkowych cząstkowych typu hiperbolicznego, którego rozwiązaniem dla zadanych warunków granicznych są funkcje  $u(x, y, t)$ ,  $v(x, y, t)$  oraz  $h(x, y, t)$ . Koniecznymi do rozwiązania powyższego problemu warunkami granicznymi są warunek początkowy oraz warunki brzegowe. Pierwszy z nich przyjmowano w przedstawionych symulacjach jako stan hydrostatyczny panujący w poszczególnych obiektach wodnych. Warunki brzegowe zadawano zaś zgodnie z teorią charakterystyk [Szymkiewicz 2000], przyjmując dodatkowo pełny poślizg na ścianach torów wodnych. Omawiane w artykule przypadki ruchu ustalonego odtwarzano poprzez zadawanie stałych w czasie warunków brzegowych.

Ze względu na złożoność zjawisk hydraulicznych powstających w trakcie przepływu w sąsiedztwie przeszkód i zmian geometrii torów wodnych oraz duży stopień skomplikowania batymetrii dna równania składające się na model zjawiska rozwiązuje się, stosując odpowiednie metody numeryczne, zapewniające ciągłość rozwiązania w rejonach zjawisk lokalnych. W zastosowanym w pracy rozwiązaniu, do dyskretyzacji przestrzennej równań zastosowano metodę objętości skończonych [LeVeque 2002], w której do aproksymacji strumieni masy i pędu (4) na brzegach komórek obliczeniowych wykorzystano metodę

Roe. Jest ona szczegółowo przedstawiona w literaturze [np. LeVeque 2002], stąd w artykule pominięto jej dokładny opis. W symulacjach numerycznych do dyskretyzacji przestrzennej wykorzystywana jest niestrukturalna siatka przestrzenna trójkątów, która może być lokalnie zagaszana w rejonach, gdzie konieczne jest zwiększenie precyzji obliczeń. Do tego celu wykorzystywany jest autorski generator siatek, wykonany w Katedrze Hydrotechniki WILiŚ PG. Całkowanie równań modelu w czasie realizowane jest metodą Rungego-Kutty drugiego rzędu. Ze względu na fakt, że jest to jeden ze schematów z grupy metod jawnych jego stabilność jest warunkowa i musi spełniać kryterium CFL [Szymkiewicz 2000]. W obliczeniach symulacyjnych wymóg ten sprowadza się do odpowiedniego ograniczenia długości kroku całkowania w czasie, w zależności od rozmiarów najmniejszych elementów numerycznej siatki przestrzennej. Przedstawiony model, wraz z weryfikacją wyników, został szczegółowo opisany we wcześniejszej pracy [Szydłowski 2007] i był z powodzeniem stosowany w różnych sytuacjach występowania przepływów szybkozmiennych [np. Szydłowski 2011]. Uzyskiwane wyniki charakteryzowały się satysfakcjonującą zgodnością jakościową z charakterystyką przepływów, a także ilościową z pomiarami laboratoryjnymi parametrów przepływu, co pozwoliło uznać go za wiarygodny.

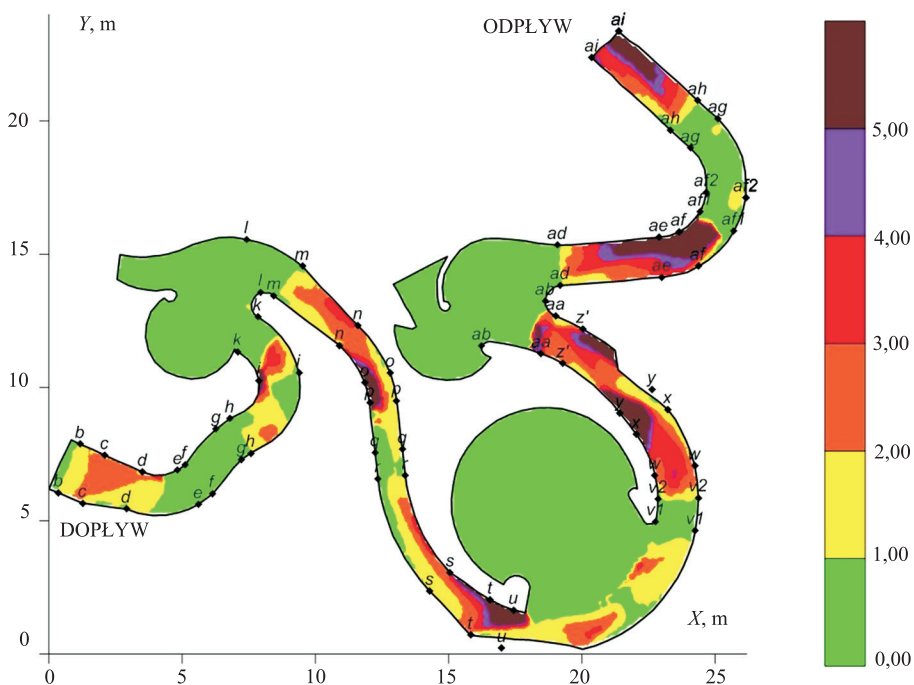
## OBLICZENIOWE ASPEKTY PROJEKTOWANIA ATRAKCJI WODNYCH

Firmy zajmujące się projektowaniem atrakcji wodnych bazują na wytycznych zebranych w normach Polskiego Komitetu Normalizacyjnego. Obecnie w celu projektowania i użytkowania atrakcji wodnych wykorzystuje się trzy podstawowe dokumenty [Norma PN-EN 1069-1:2010, Norma PN-EN 1069-2:2010, Norma PN-EN 13451-3:2011], mające charakter opisowy. Większość zawartych w normach zaleceń dotyczących bezpieczeństwa ujętych jest w formie ogólnikowej. Brak jest ścisłych wytycznych w jaki sposób można je spełnić i zostawia się to doświadczeniu projektantów. Sprecyzowane zostały jedynie dopuszczalne przyspieszenia i czas ich oddziaływania na użytkownika oraz podana przy klasyfikacji typów zjeżdżalni maksymalna prędkość. Ostatecznie kwestię bezpieczeństwa weryfikuje się podczas testów praktycznych, obejmujących próbne zjazdy na gotowym obiekcie. Na klasycznej zjeżdżalni wodnej użytkownik ześlizguje się pod wpływem siły ciężkości, a woda służy jedynie do zmniejszenia tarcia. Uzyskane wrażenia związane są z siłami działającymi na użytkownika, a te zależą m.in od spadku rynny, liczby zakrętów, ich promieni oraz kombinacji tych elementów. Jednak osoba korzystająca z obiektu typu „dzika rzeka”, w przeciwieństwie do klasycznej zjeżdżalni, nie jest poddana dużym przeciążeniom ani przyspieszeniom. Na ruch osoby zanurzonej w wodzie wpływa przede wszystkim strumień płynącej wody. Dynamika przepływu strumienia jest determinowana geometrią koryta. Kształt koryta i spadek wpływają na rodzaj przepływu wody w nim zachodzący i występujące zjawiska hydrauliczne. W tym przypadku atrakcyjny i bezpieczny obiekt wymaga analizy hydrodynamiki przepływu. O ile modelowanie ruchu człowieka wzdłuż rynny zjeżdżalni wodnej oraz związane z tym ryzyko zostały już dość dobrze rozpoznane [Szczepaniak 2009], to wciąż brak jest odpowiedniej metody oceny zagrożenia dla użytkowników obiektów typu „dzika rzeka”. Propozycję metody oceny bezpieczeństwa tego typu obiektu opisano w pracy Siedleckiej i Szydłowskiego [2016]. Istotą przedstawionej metodyki jest wykonanie na etapie projektowania symulacji przepływu dla przyjętej koncepcji geometrii toru i analiza parametrów takich jak prędkość,

głębokość, liczba Frouda, a także lokalizacja hydraulicznych zjawisk lokalnych. Znają te wielkości oraz porównując je z wartościami kryterialnymi można pokusić się o ocenę zagrożenia zarówno dla osób dorosłych, jak i dzieci. We wspomnianym artykule zaproponowano również wstępnie kryteria bezpieczeństwa. W przypadku, gdy zaprojektowany obiekt wodny nie spełnia proponowanych warunków bezpiecznego użytkowania, należy koncepcję geometrii toru i warunków pracy obiektu zmienić i ponownie poddać przepływ symulacjom numerycznym. Dzięki możliwości elastycznych zmian geometrii obszaru przepływu w symulacjach numerycznych, można w precyzyjny sposób zaprojektować bezpieczną dla użytkowników trasę zjazdu.

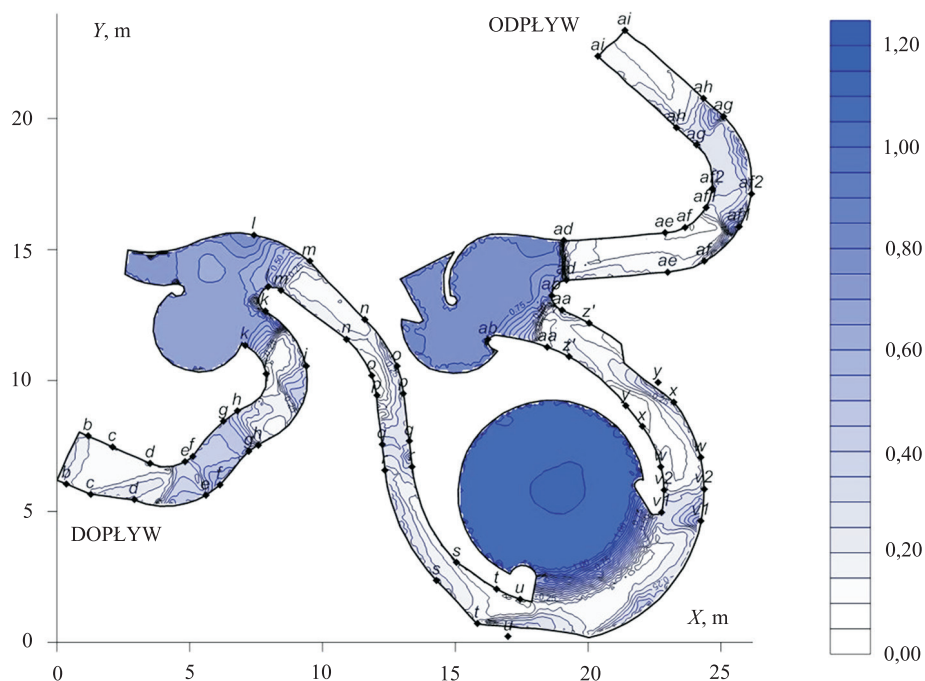
W przywołanym artykule [Siedlecka i Szydłowski 2016] zbadano aspekty bezpieczeństwa już istniejącego toru wodnego „dzikiej rzeki”, eksploatowanego w parku wodnym w Sopocie. W tym celu wykorzystano opracowany model przepływu płaskiego [Szydłowski 2007] i wykonano symulację numeryczną przepływu dla wydatku eksploatacyjnego, której przykładowe wyniki pokazano na ryc. 3 i 4.

Otrzymane na potrzeby analizy bezpieczeństwa użytkowania zjeżdżalni wyniki obliczeń [Siedlecka i Szydłowski 2016] mają potwierdzenie w wynikach pomiarów na modelu fizycznym obiektu oraz obserwacji w rzeczywistości. Przykładowo na ryc. 5 pokazano wyniki modelowania fizycznego [Burzyński i Szydłowski 2002] oraz rzeczywisty przepływ w rejonie przekroju af1, czyli na końcowym łuku toru „dzikiej rzeki”. Widoczna jest jakościowa zgodność wyników symulacji numerycznej (ryc. 3 i 4) z obserwacjami.

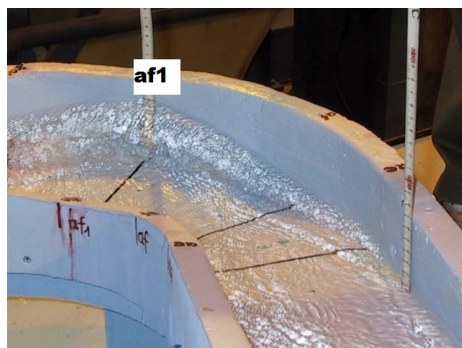


Ryc. 3. Rozkład liczby Frouda na obiekcie „dzika rzeka” w parku wodnym w Sopocie  
Fig. 3. Distribution of Froude number along the “wild river” in waterpark in Sopot





Ryc. 4. Rozkład głębokości (m) na obiekcie „dzika rzeka” w parku wodnym w Sopocie  
 Fig. 4. Distribution of depth (m) along the “wild river” water slide in waterpark in Sopot



Ryc. 5. Przepływ wody w obiekcie „dzika rzeka” – model 1:10 i rzeczywistość  
 Fig. 5. Water flow along the “wild river” slide – model 1:10 and reality

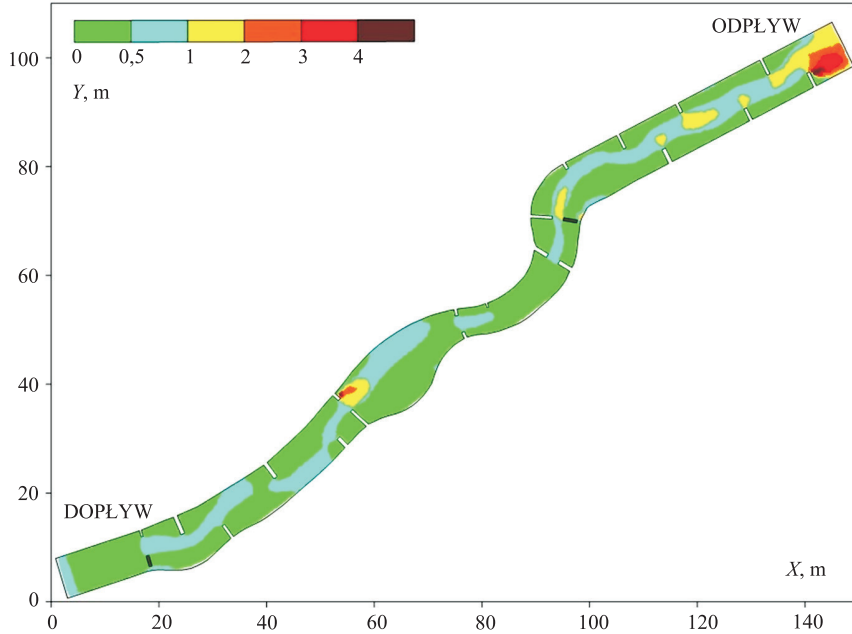
W obliczeniach wiarygodnie odtworzone zostały zarówno płytkie strefy ruchu rwącego, jak i spiętrzenie na zewnętrznej ścianie toru, związane ze zmianą przepływu w spokojny. Satisfakcjonujący wynik symulacji numerycznej, odwzorowujący rzeczywisty przepływ na zjeżdżalni wodnej na pokazanym odcinku, jak i w innych rejonach obiektu, pozwala stwierdzić, że symulacja numeryczna wiarygodnie odwzorowuje układ zjawisk hydraulicznych wzdłuż rozpatrywanego toru wodnego.

Z podobnymi jak dla zjeżdżalni wodnych problemami projektowania spotykamy się w przypadku opracowywania koncepcji nowych lub modernizowania istniejących torów kajakarstwa górskiego [Szydłowski i Otta 2014]. Te specyficzne instalacje wodne, niekiedy wykonywane w korytach cieków naturalnych, a kiedy indziej projektowane jako obiekty sztuczne, muszą spełniać zarówno wymagania sportowców, być odpowiednio atrakcyjne dla użytkowników i widzów, ale także sprostać wymogom bezpiecznego użytkowania przez kajakarzy. Najbardziej popularny w kajakarstwie górskim slalom jest obecnie dyscypliną olimpijską, a na igrzyskach pojawił po raz pierwszy w roku 1972 w Monachium. Zawody polegają w tym przypadku na przejeździe trasy toru kajakowego przez bramki zawieszane nad bystro płynącą wodą (ang. *white water*). Wymagania, jakie są stawiane torom kajakarstwa górskiego, opisują przepisy Polskiego Związku Kajakowego oraz Międzynarodowego Komitetu Olimpijskiego. Podstawowe wymagania to długość, która powinna mieścić się w przedziale od 200 do 400 m, i czas przejazdu zawodnika w granicach 90 s. Wymagania te w znacznym stopniu determinują geometrię toru. Dodatkowo, aby osiągnąć odpowiedni poziom techniczny toru, spełniając jednocześnie wymagania bezpieczeństwa, trzeba we właściwy sposób zaprojektować rozkład szykan, miejscowe zwężenia koryta oraz progi. Prócz wspomnianej długości, podstawowe wytyczne do projektowania torów kajakarstwa górskiego są następujące [Cubanov a i Rumann 2009]:

- trapezowy lub U-kształtny przekrój poprzeczny,
- optymalna szerokość toru 10–12 m (minimalnie 8 m, podwójna długość kajaka),
- głębokość minimalna 0,4 m (umożliwiająca bezpieczny ruch łódki), głębokość średnia w granicach od 0,75 do 0,9 m (zapewniająca bezpieczne wykonanie przez zawodnika obrotu w pionie, eskimoski); do ewolucji freestyle wymagana głębokość to 1,5 m,
- prędkość przepływu około  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , dla początkujących w granicach od 1,4 do  $1,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , jednocześnie dopuszcza się występowanie stref o większych prędkościach,
- szorstkość dna i ścian koryta powinna być mała, by zapobiegać uszkodzeniu kajaków oraz osób (zwykle wygładzony beton, przeszkody z tworzyw sztucznych).

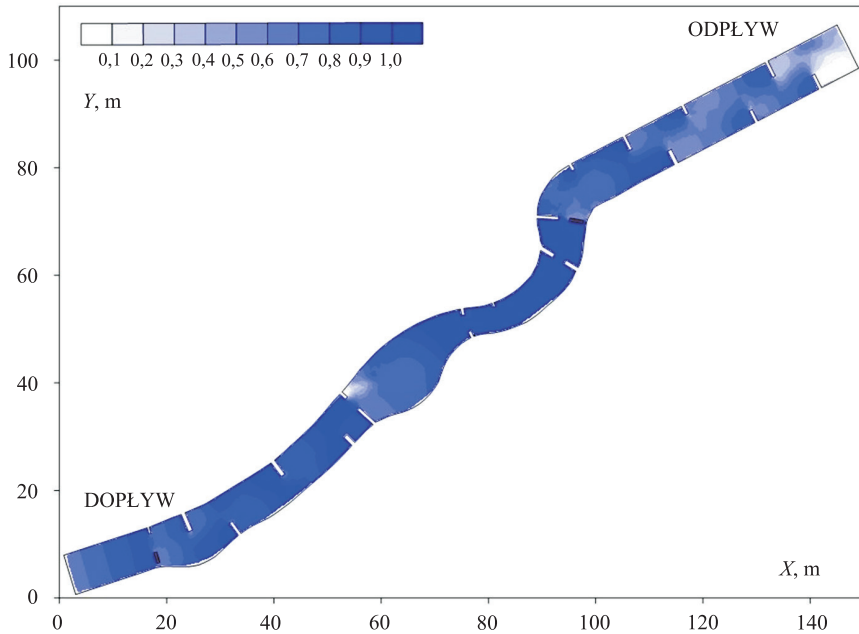
Dla kajakarzy duże znaczenie ma również lokalizacja odskoków hydraulicznych oraz ich rodzaj, związany z lokalnymi wartościami liczby Frouda. Odskoki są jednym z oczekiwanych i podstawowych elementów, które muszą pojawić na trasie spływu. Stopień rozbudowania odskoków ma jednak ogromne znaczenie dla bezpieczeństwa przepływu zawodników. Już odskok oscylujący ( $Fr > 2,5$ ) może być niebezpieczny dla kajakarza. Pionowa cyrkulacja wody w tego typu strukturze może być tak silna, że zatrzyma zawodnika pod powierzchnią wody, co grozi jego utopieniem się. Wszystkie wymienione parametry projektowe można przeanalizować wykonując symulację przepływu wody w przyjętej geometrii toru i umieszczonych w nim przeszkód.

Jako przykład hydraulicznej analizy przepływu na torze kajakarstwa górskiego przedstawiono symulację przepływu na obiekcie sportowym w Drzewicy [Szydłowski i Otta 2014]. Występujące na torze przeszkody, umocowane w korycie zgodnie z projektem modernizacji obiektu, odwzorowano w geometrii obszaru przepływu w postaci ostróg brzegowych. Symulację przepływu wykonano dla przepływu  $8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , a przykładowe wyniki pokazano na ryc. 6 i 7. Uzyskane wyniki porównano w sposób jakościowy (wizualnie bez pomiarów) z obserwacjami rzeczywistego przepływu na torze.



Ryc. 6. Rozkład liczby Frouda na torze kajakarstwa górskiego w Drzewicy

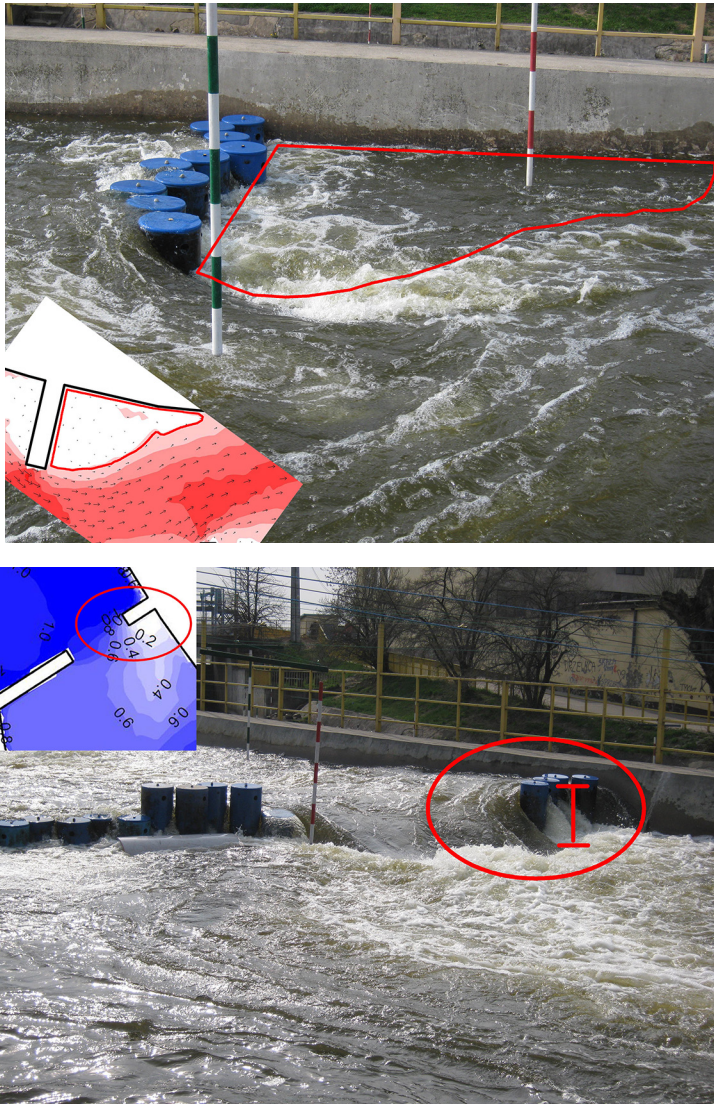
Fig. 6. Distribution of Froude number along the “white water” course in Drzewica



Ryc. 7. Rozkład głębokości (m) na torze kajakarstwa górskiego w Drzewicy

Fig. 7. Distribution of depth (m) along the “white water” course in Drzewica

O wiarygodności wyników obliczeń świadczy zadowalające odwzorowanie lokalizacji rzeczywistych stref martwych, przepływów zwrotnych oraz stref depresji i spiężeń zwierciadła wody zaobserwowanych w okolicach przeszkód. Przykład takiego zestawienia pokazano na ryc. 8. Na pierwszym zdjęciu ukazano strefę zawirowania poniżej jednej z ostróg (przeszkód) umieszczonych na lewym brzegu toru, zaznaczając ją obwiednią. Podobne zjawisko przepływów zwrotnych zostało odtworzone w wynikach obliczeń i widoczne jest na tej samej rycinie jako zona o znacznie mniejszych prędkościach prze-



Ryc. 8. Przepływ na torze kajakarstwa górskiego w Drzewicy – opis w tekście  
 Fig. 8. Water flow along the “white water” course in Drzewica – description in text



plywu. Na zdjęciu drugim pokazano inną szykanę na lewym brzegu toru, przy której zaobserwowano silną depresję zwierciadła wody i towarzyszącą jej zmianę z ruchu spokojnego w rwący. Ta znaczna deniwelacją zwierciadła została także odtworzona w symulacji numerycznej, co pokazano na dołączonym do fotografii wycinku obliczonego pola głębokości. Analizując przepływ przy wspomnianych dwóch przeszkodach, jak i w innych lokalizacjach na torze, można stwierdzić, że zarówno obliczone spiętrzenia wody, jak i depresje zwierciadła mają potwierdzenie w rzeczywistości. Ponadto w symulacji i na prawdziwym obiekcie zauważyć można cechy ruchu rwącego wody w przestrzeni między przeszkodami. Widoczne są również przejścia z ruchu rwącego w spokojny, których przejawem są odskoki hydrauliczne.

Możliwość lokalizacji tych zjawisk oraz oznaczenie ich intensywności poprzez oszacowanie liczby Frouda pozwala projektantom ocenić skalę atrakcyjności strumienia płynącej wody, a także przeanalizować aspekt ryzyka wynikającego z obecności zjawisk lokalnych. Znajomość rozkładu prędkości, głębokości i liczby Frouda umożliwia integralną ocenę cech toru pod względem wymaganych parametrów sportowych i bezpieczeństwa kajakarzy. Przykładowo można stwierdzić, że analizowany po modernizacji układ toru w Drzewicy charakteryzuje się głębokościami wystarczającymi do pływania kajaków, obrotu w pionie kajakarza bez zagrożenia uderzeniem głową w dno, a jednocześnie mniejszą od wzrostu człowieka, co zapewnia pożądany poziom bezpieczeństwa zawodów sportowych. Jednocześnie prędkość strumienia i hydrauliczne zjawiska lokalne zapewniają wysoką atrakcyjność obiektu. Gdyby jednak stwierdzono potrzebę korekty układu przeszkód i szykan bez potrzeby ingerencji w rzeczywisty obiekt i wykonywania czasochłonnych prac budowlanych. Wskazuje to na głęboki sens stosowania symulacji numerycznych do badania hydrauliki torów kajakarstwa górskiego.

## PODSUMOWANIE

Wzrost popularności rekreacji wodnej w Polsce objawia się przyrostem nowych parków wodnych i obiektów sportowych. O ile ich atrakcyjność wizualna jest efektem koncepcji architektonicznych, o tyle wartość sportowa i bezpieczeństwo użytkowania w znacznej mierze zależą od parametrów hydrodynamicznych strumienia wody przemieszczającego się w tych obiektach. Stąd na etapie projektowania niezbędne jest wykonanie prawidłowych obliczeń hydraulicznych, które pozwalają wyznaczyć podstawowe parametry przepływu takie jak rozkłady głębokości i prędkości oraz zlokalizować hydrauliczne zjawiska lokalne w postaci spiętrzeń, stref martwych, wirów, odskoków, bystrzy etc. Tradycyjnie projektowanie tego typu torów wodnych realizuje się metodą prób, wykorzystując doświadczenie projektantów i wykonawców. Rzadko korzysta się z laboratoryjnych badań modelowych, a symulacje komputerowe są sporadyczne.

W pracy przedstawiono przykłady wykorzystania modelu przepływu wody płytkiej jako narzędzia do symulacji podstawowych cech przepływu wody na zjeżdżalni wodnej typu „dzika rzeka” oraz w korycie toru kajakarstwa górskiego. Dobra zgodność obliczonych i obserwowanych w rzeczywistości cech strumienia wody wskazuje, że zaproponowany sposób obliczeń nadaje się do wspomaganie projektowania nowych



i analiz już istniejących rekreacyjnych i sportowych instalacji wodnych. Umożliwia on precyzyjne symulowanie ruchu wody we wszelkiego rodzaju korytach otwartych oraz zapewnia możliwość łatwego analizowania wielowariantowych koncepcji projektowanych obiektów.

Podsumowując wykonane badania, można stwierdzić, że stosując model przepływu płaskiego i wolnozmiennego, można uzyskać wiarygodne wyniki symulacji szybkozmiennego przepływu w opisanych korytach rekreacyjnych torów wodnych.

## PIŚMIENNICTWO

- Abbott, M.B. (1979). Computational hydraulics: elements of the theory of free-surface flows. Pitman, London.
- Burzyński, K., Szydłowski, M. (2002). Physical Modeling of Water Flow in „Wild River” type Water Slide. Arch. Hydro-Engin. Environ. Mechanics, 49(4), 37–54.
- Cubanova, L., Rumann, J. (2009). Whitewater Course Design in Slovakia. Proc. Intern. Symp. on Water Management and Hydraulic Engineering, Macedonia, 221–228.
- Goodman, F.R., Parr, G.B. (1994). The design of artificial white water canoeing courses. Proc. Instn. Civ. Engrs. Mun. Engr., 103, 191–202.
- LeVeque, R.J. (2002). Finite volume methods for hyperbolic problems. Cambridge University Press, New York 2002.
- Pollert, J. jun., Pollert, J. sen., Procházka, J., Chmátal, P., Campbell, B., Felton, J., Dungworth, D. (2015). Physical and Mathematical Modelling for Canoe Slalom Whitewater and the 2016 Olympic Games in Rio de Janeiro. Proc. Intern. Symp. on Water Management and Hydraulic Engineering, Brno, Czech Republic, 65–75.
- Sawicki, J.M. (1998). Przepływy ze swobodną powierzchnią, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Siedlecka, A., Szydłowski, M. (2016). Propozycja metody oceny bezpieczeństwa użytkowania rekreacyjnego obiektu wodnego typu „dzika rzeka”. Gaz Woda Tech. Sanit., 6, 221–224.
- Szczepaniak, P. (2009). Modelowanie ruchu w zjeżdżalniach wodnych. Symulacja komputerowa i jej weryfikacja doświadczalna. Modelow. Inżyn., 7(38), 21–31.
- Szydłowski, M. (2007). Modelowanie fal powodziowych na terenach zabudowanych. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk.
- Szydłowski, M. (2011). Numerical simulation of open channel flow between bridge piers. TASK Quarterly, 15(3–4), 271–282.
- Szydłowski, M., Otta, J. (2014). Numeryczna analiza hydrauliki toru kajakarstwa górskiego w Drzewicy. Gaz Woda Tech. Sanit., 10, 398–402.
- Szymkiewicz, R. (2000). Modelowanie matematyczne przepływów w rzekach i kanałach. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Norma 1: PN-EN 1069-1:2010 – Zjeżdżalnie wodne o wysokości 2m i większej. Część 1: Wymagania bezpieczeństwa i metody badań.
- Norma 2: PN-EN 1069-2:2010 – Zjeżdżalnie wodne o wysokości 2m i większej. Część 2: Instrukcje.
- Norma 3: PN-EN 13451-3:2011 – Dodatkowe szczegółowe wymagania bezpieczeństwa i metody badań otworów wlotowych, otworów wylotowych oraz wody/powietrza związanych z właściwościami rekreacyjnymi wody.

## NUMERICAL MODELING OF HYDRODYNAMICS AS A TOOL FOR DESIGN OF THE LEISURE AND SPORT WATER STRUCTURES

**Abstract.** The paper presents the possibility of application of numerical simulations to design of water leisure and sport objects. People in waterparks, sportsmen and fans expect exceptional experience in the water objects together with guarantee of safety. It strongly depends on water flow hydrodynamics. In order to properly fit geometric and hydraulic parameters of objects as wild river slides and white water courses for canoeing, there is a need to analyse the structure of water flow. The forecasting of hydraulic local effects, as well as precise estimation of water depth and flow velocity are necessary for proper design of configuration of any water course. The numerical simulation was proposed in the paper to achieve the goal. As the mathematical model of the free surface flow, the shallow water equations were assumed. In order to solve the equations the numerical scheme based on finite volume method was applied. As the example applications, the numerical analysis of the water flow along “wild river” water slide in waterpark in Sopot and whitewater course in Drzewica were presented. The results of flow simulation seem reliable, what makes possible to recommend this type of approach to designers of water attractions, which is the main conclusion resulting from this work.

**Key words:** mathematical modeling, hydrodynamics, hydraulic engineering, leisure, sport, security, designing

*Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 1.12.2016*

Do cytowań – For citation: Szydłowski, M. (2016). Numeryczne modelowanie hydrodynamiki jako narzędzie wspomaganie projektowania rekreacyjnych i sportowych obiektów wodnych. Acta. Sci. Pol., Formatio Circumiectus, 15(4), 353–367.