

Jakub HAKIEL*

PRZEPUSTOWOŚĆ MAŁYCH CIEKÓW POWIERZCHNIOWYCH NA TERENACH ZURBANIZOWANYCH

Ze względu na postępującą urbanizację terenów miejskich, wody opadowe zostają coraz szybciej odprowadzane do odbiorników, jakimi są zazwyczaj niewielkie cieki powierzchniowe. Wiąże się to ze zwiększonymi przepływami w potokach i gwałtowniejszym przebiegiem wezbrań. Przepustowość koryt jednak pozostaje w większości przypadków niezmienna. Ponieważ powstawały one w wyniku naturalnych procesów lub też są to konstrukcje wybudowane wiele lat temu, często nie są w stanie przejąć całości wód opadowych. Prawidłowe określenie przepustowości cieku wymaga szczegółowej i wnikliwej analizy, dlatego ważne jest, aby prawidłowo zlokalizować odcinki newralgiczne, które podczas wezbrania mogą stanowić kluczowe dla zagrożenia powodziowego punkty. Ze względu na długość procesów, w wyniku których powstawały rzeki oraz wiele lat ingerencji człowieka w ich kształt, cieki na terenach zurbanizowanych charakteryzuje nadzwyczaj duża różnorodność i dlatego szczególnie ważne jest wykorzystanie odpowiednich metod do analizy hydraulicznej poszczególnych ich części. W pracy dokonano wstępnej analizy przepustowości koryta na przykładzie potoku Strzyża w Gdańsku mającej na celu określenie, dla których odcinków cieku należałoby w pierwszej kolejności dokonać szczegółowych obliczeń. Obliczono wielkości maksymalne przepływów mieszczących się w korycie potoku dla odpowiednio wybranych przekroi oraz dokonano zestawienia ich z przepływami miarodajnymi, w celu prawidłowej interpretacji wyników. W podsumowaniu, na podstawie wyników obliczeń oraz wizji lokalnej, określono wstępnie sposób dalszej analizy przepustowości koryta oraz określono, które z rozpatrywanych odcinków można uznać za newralgiczne.

1. WSTĘP

Niewielkie cieki wodne na terenach zurbanizowanych stanowią integralną część sieci hydrograficznej miast. Poza ich rolę w ekosystemie zapewniają one stałą możliwość lokalnego odprowadzania wód opadowych do większych odbiorników. Jest to

* Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Katedra Hydrotechniki, ul. Gabriela Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

duże udogodnienie i ułatwienie w gospodarowaniu wodami deszczowymi, ale jednocześnie może stanowić zagrożenie powodziowe na terenach, przez które przepływa ciek. Pomimo tego, że im bliżej ujścia do odbiornika tym większa staje się zlewnia z której odbierana jest przez ciek woda i tym większe stają się przepływy, nie oznacza to w każdym przypadku wzrostu przepustowości koryta. Na długości w znacznym stopniu może zmieniać się charakter koryta potoku, a co za tym idzie zmienia się jednocześnie jego przepustowość. Ważne w takiej sytuacji staje się prawidłowe określenie jakie czynniki wpływają na jego przepustowość na danym odcinku. Poza podstawowymi parametrami określającymi maksymalny strumień objętości przepływu takimi jak wymiary geometryczne, spadek czy materiał, z którego wykonano koryto, mogą pojawić się czynniki dodatkowo go ograniczające takie jak roślinność występująca na terenach zalewowych czy chociażby występująca często na terenach silnie zurbanizowanych gęsta zabudowa hydrotechniczna [1]. Analizując ściśle przepustowość niewielkich cieków wodnych występujących na terenach miejskich należy wziąć pod uwagę łatwy dostęp do niego, który bardzo często w newralgicznych punktach może skutkować dużym zanieczyszczeniem koryta. Aspekty te są często bardzo trudne do uwzględnienia w obliczeniach i niemożliwa jest kompleksowa analiza przepustowości z uwzględnieniem wszystkich zagrożeń mogących powodować jej ograniczenie. Dlatego też, istotne staje się skuteczne określenie odcinków lub też pojedynczych przekroi, które stanowić mogą szczególne zagrożenie i wykonanie dla nich bardziej złożonej analizy z uwzględnieniem wszystkich elementów mogących wpływać na przepustowość.

W niniejszym opracowaniu na przykładzie potoku Strzyża zlokalizowanego w mieście Gdańsk, na podstawie wstępnej analizy przepustowości koryta oraz wizji lokalnej dokonano określenia, które odcinki cieku stanowią zagrożenie oraz mogą zostać uznane za newralgiczne w obliczaniu przepustowości potoku. Odcinki te powinny w dalszym toku obliczeń zostać poddane szczegółowej analizie z uwzględnieniem istotnych dla nich problemów.

2. PRZEPUSTOWOŚĆ KORYTA

Przepustowość koryt rzecznych określana może być za pomocą pomiarów bezpośrednich lub obliczeń zakładając, że w cieku występuje ruch ustalony. Do wstępnej oceny najefektywniejsze są metody obliczeniowe, ponieważ pozwalają na podstawie pomiarów podstawowych parametrów określić teoretyczną przepustowość koryta [6]. Najczęściej wykorzystywana w tym celu jest zależność potęgowa Gaucklera-Manninga-Stricklera pozwalająca na obliczenie prędkości średniej [2, 5]:

$$v = k_{st} R^{2/3} J^{1/2} \quad (1)$$

gdzie:

- v – średnia prędkość przepływu [m/s],
- k_{st} – współczynnik szorstkości koryta wg Stricklera [$m^{1/3}/s$],
- R – promień hydrauliczny [m],
- J – spadek linii energii [-].

W warunkach ruchu jednostajnego ustalonego za spadek linii energii można przyjąć spadek linii dna. Współczynnik szorstkości koryta wg Stricklera (k_{st}) można zastąpić współczynnikiem szorstkości wg Manninga (n), a ich zależność kształtuje się następująco [2, 5]:

$$k_{st} = \frac{1}{n} \quad (2)$$

gdzie:

- n – współczynnik szorstkości koryta wg Manninga [$s/m^{1/3}$].

Powyższe formuły pozwalają na skuteczne obliczenie średniej prędkości przepływu dla koryt zwartych o kształtach zbliżonych do regularnych, o napełnieniu zbliżonym do napełnienia średniego na całej szerokości przekroju [4].

Na podstawie znanej wartości prędkości średniej w przekroju oraz znanej geometrii koryta można obliczyć natężenie przepływu ze wzoru [6]:

$$Q = VA \quad (3)$$

gdzie:

- Q – natężenie (strumień objętości) przepływu [m^3/s],
- V – prędkość średnia przepływu [m/s],
- A – pole powierzchni przekroju strumienia w korycie [m^2].

3. WSTĘPNA ANALIZA PRZEPUSTOWOŚCI KORYTA

3.1. CHARAKTERYSTYKA ANALIZOWANEGO KORYTA

W celu określenia newralgicznych odcinków typowego potoku, który stanowi odbiornik wód opadowych z terenów miejskich, dokonano obliczeń przepustowości koryta dla 12 przekroi znajdujących się na potoku Strzyża w Gdańsku. Ciek ten o długości 12,763 km w całości przepływa w granicach administracyjnych miasta Gdańsk. Dopływają do niego wody deszczowe ze zlewni o powierzchni prawie

34 km², z czego około 40% stanowią tereny miejskie, w tym w większości zurbanizowane [8].

W związku ze zróżnicowanym terenem przez jaki przepływa Strzyża charakter jej koryta wielokrotnie się zmienia. Pozwoliło to na wyodrębnienie 3 grup przekroi, dla których dokonano analizy. Przekroje 1–4 położone są w obrębie Trójmiejskiego Parku Krajobrazowego, gdzie potok płynie w korycie naturalnym w głębokiej dolinie. Odcinek ten charakteryzuje niewielkie koryto główne o dość dużej szorstkości i pokryty ściółką leśną, ale niezarośnięty teren zalewowy. Na tym odcinku spadek podłużny potoku wynosi średnio 1,5%, a jego maksymalne wartości dochodzą nawet do 3%. Kolejne 4 przekroje (5–8) znajdują się na odcinku, gdzie Strzyża przepływa między zabudowaniami, jednak jej koryto dalej ma charakter naturalny. Na tym odcinku, w odróżnieniu do poprzedniego, pojawia się gęsta roślinność w formie krzewów oraz pojedynczych drzew na terenie zalewowym, a spadek zmniejsza się do średniej wartości 0,8%. Ostatnie przekroje (9-12) obejmują koryta na terenie silnie zurbanizowanej dzielnicy Gdańska-Wrzeszcz. Potok jest na tym odcinku całkowicie uregulowany i w przypadku przekrojów 9 oraz 10 nie posiada terenu zalewowego, sąsiaduje za to bezpośrednio z drogą oraz zabudowaniami. Trzeci z analizowanych odcinków potoku Strzyża charakteryzuje się również najmniejszym spadkiem podłużnym zawierającym się między 0,9% a 0,3%.

3.2. PODSTAWA OBLICZEŃ

Do oszacowania przepustowości koryta posłużono się zależnością Gaucklera-Manninga-Stricklera (1) służącą do obliczania średniej prędkości przepływu w korycie. Następnie otrzymane wartości odniesiono do geometrii koryta, zgodnie ze wzorem (3), tak aby otrzymać wartości strumienia objętości przepływu.

Obliczeń przepustowości koryta w wybranych przekrojach dokonano w oparciu o pomiary geodezyjne wykonane w ramach projektu badawczo-rozwojowego [8]. W celu umożliwienia określenia przepustowości koryta należało określić jaki poziom napelnienia koryta wyznaczać będzie wodę brzegową, a ograniczony w ten sposób przekrój podzielić na koryto główne oraz tereny zalewowe. Spadki podłużne potrzebne do wykonania obliczeń uzyskano z pomiarów geodezyjnych profili podłużnych potoku Strzyża [7]. Wykorzystano średnie spadki na odcinkach sąsiadujących rozpatrywanym przekrojom dolinowym.

Na podstawie inwentaryzacji przyjęto współczynniki Manninga zależne od materiału oraz stanu faktycznego koryta [1, 3]. Uwzględniono zróżnicowanie materiału znajdującego się na dnie oraz brzegach koryta oraz różne zagospodarowanie terenu zalewowego. Przekroje zostały dobrane w taki sposób, aby spełniały ograniczenia dotyczące wykorzystywanych wzorów (pkt. 2) [5].

3.3. WYNIKI

Wyniki obliczeń dla rozpatrywanych przekrojów podzielono zgodnie z charakterem koryta oraz kolejnością ich występowania w cieku. Wyodrębniono część przepływu, którą jest wstanie przyjąć koryto główne oraz całkowitą przepustowość koryta razem z terenem zalewowym. W celu umożliwienia dokonania pełnej analizy otrzymanych przepustowości koryt zestawiono je z przepływami miarodajnych przyjętymi wg opracowania hydrologicznego wykonanego dla potoku Strzyża [8]. Uwzględniono przepływy o prawdopodobieństwach przekroczenia kolejno $p = 10\%$ oraz $p = 1\%$.

Tabela 1. Przepustowości koryta w przekrojach

Nr przekroju	Rodzaj koryta	Przepustowości		Przepływy miarodajne	
		- koryto główne	- całkowita	$p = 10\%$	$p = 1\%$
		[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]
1	Koryto naturalne Teren leśny	2,07	6,86	1,25	7,27
2		1,95	7,19	1,25	7,27
3		3,71	4,81	1,25	7,27
4		2,39	5,84	1,25	7,27
5	Koryto naturalne Teren zabudowany	6,11	14,58	1,96	10,93
6		2,87	11,56	1,60	11,41
7		6,25	9,51	1,02	8,66
8		5,60	27,18	1,02	8,65
9	Koryto uregulowane Teren zabudowany	8,24	8,24	4,13	9,03
10		5,94	5,94	4,13	9,03
11		12,37	18,14	11,77	26,41
12		12,22	13,62	11,77	26,41

3.4. PODSUMOWANIE

Szacunkowe obliczenia wskazują na dużą zmienność przepustowości koryta na długości, związane jest to ze zmianą jego charakteru oraz koniecznością odebrania coraz większego strumienia objętości wód opadowych ze zurbanizowanych terenów miejskich. Na analizowanych odcinkach we wszystkich przekrojach koryto główne potoku jest w stanie przyjąć przepływ o prawdopodobieństwie przekroczenia $p=10\%$, jednak jedynie w przekrojach nr 5, 6, 7 oraz 8 przepustowość całkowita jest większa od przepływu $p=1\%$. Skutkować to może wystąpieniem wody z koryta w pozostałych przekrojach.

W przekrojach 1–4 nie stanowi to jednak zagrożenia, ponieważ potok płynie na tym odcinku na terenach leśnych, na których nie występuje żadna zabudowa. Przekroczenie przepustowości koryta na tym odcinku spowoduje jednak zmniejszenie prze-

plywu prowadzonego korytem i ograniczy wezbranie na terenach zurbanizowanych znajdujących się w dalszej części potoku.

Wspomniany już odcinek obejmujący przekroje 5–8 jest wstanie przejąć przepływ miarodajny o prawdopodobieństwie przekroczenia $p=1$ %. Spowodowane jest to dużymi wymiarami koryta na tym odcinku, łącznie z terenem zalewowym osiąga ono szerokość nawet 40 m. Dokonane szacunkowe obliczenie przepustowości dla tego odcinka może okazać się jednak niewystarczające, ponieważ tą część potoku charakteryzuje gęsta roślinność na terenach zalewowych, do której opisanie może być potrzebne wykorzystanie dodatkowych formuł uwzględniających opory ruchu w terenie zadrzewionym oraz zakrzewionym [1].

Końcowy odcinek potoku, który charakteryzuje uregulowana forma koryta w analizowanych przekrojach okazał się niewystarczający do przyjęcia wody stuletniej (przepływ $p=1$ %). Jest to szczególnie istotne i stanowi duże zagrożenie ze względu na lokalizację cieków w terenie silnie zurbanizowanym. Potencjalne wystąpienie wody z koryta może stanowić realne zagrożenie terenów mieszkalnych oraz przemysłowych. Istotny dla obliczeń przepustowości koryta w przekrojach 9 i 10 jest również całkowity brak terenu zalewowego, oznacza to, że wymiary koryta głównego określają całkowitą przepustowość cieków (tab. 1). Dodatkowym czynnikiem charakterystycznym dla uregulowanych odcinków potoków na terenach silnie zurbanizowanych, który bez wątplenia należy uwzględnić w obliczeniach przepustowości, jest gęsto występująca na tych obszarach zabudowa hydrotechniczna (typu: przepusty, piaskowniki, małe zbiorniki retencyjne) oraz mosty. Stanowi to szczególne zagrożenie w połączeniu z szybko propagującą w kanałach zabudowanych falą wezbraniową.

4. WNIOSKI

Na podstawie dokonanej szacunkowej analizy przepustowości koryta w analizowanych przekrojach oraz porównaniu jej z przepływami miarodajnymi można wstępnie określić charakter cieków, dla których szczególnie istotne jest prawidłowe określenie przepustowości.

Na terenach leśnych potencjalne przekroczenie jego przepustowości nie wiąże się zagrożeniem terenów mieszkalnych oraz zabudowań. Dodatkowo przekroje leśne zazwyczaj charakteryzują duże wymiary geometryczne terenów zalewowych [1]. Na przebieg wezbrania wpływa też niewielki oraz rozłożony w czasie odpływ wód z terenów o przepuszczalnej powierzchni. Biorąc to pod uwagę, jeżeli nie istnieją dodatkowe okoliczności to koryto naturalne na terenach leśnych nie wymaga szczegółowej analizy.

Dla odcinka obejmującego przekroje 5–8 należy uznać, że niezbędny jest dokładniejszy opis przepustowości koryta uwzględniający charakterystykę przepływu

w terenie z roślinnością. Ponieważ koryto znajduje się w tym przypadku na terenie zabudowanym, szczególnie ważne jest poprawne wykonanie obliczeń dotyczących przepustowości. Należy również zwrócić uwagę, na fakt, że podczas wezbrania teren zalewowy na którym znajdują się drzewa oraz krzewy może powodować odkładanie się zarówno zanieczyszczeń jak i rumowiska niesionego przez potok, skutkiem czego mogłoby być dodatkowe zmniejszenie przepustowości koryta. Szczególnie istotne jest to dla przekrojów, które znajdują się bezpośrednio za odcinkiem potoku przepływającym przez tereny leśne (przekrój nr 5).

Z punktu widzenia skutków niedostatecznie dużej przepustowości koryta najistotniejsze wydają się przekroje położone na terenach o gęstej zabudowie, gdzie występuje koryto o charakterze uregulowanym. W takich sytuacjach zazwyczaj wymiary cieku narzucone są przez czynniki zewnętrzne co powoduje, że mamy do czynienia z korytami o przekroju prostokątnym, gdzie niezbędne w celu uzyskania odpowiedniej przepustowości jest pogłębienie koryta. Należy zwrócić tu uwagę na zagrożenia mogące powodować zmniejszenie przepustowości cieku w newralgicznych momentach szczególnie w przekrojach mostowych oraz w miejscach występującej zabudowy hydrotechnicznej.

Podsumowując, wyniki analiz wskazały, że dla odcinków znajdujących się na terenie zabudowanym ważne jest indywidualne podejście do obliczania przepustowości danego koryta. Pomimo niewielkich rozmiarów, cieki znajdujące się na terenach zabudowanych mogą mieć bardzo zróżnicowany charakter (koryto naturalne lub uregulowane), co wymaga wykorzystania odmiennych metod obliczeniowych. Należy dobrać narzędzia tak, aby w jak najlepszy sposób opisywały one zagadnienia dotyczące danego rodzaju koryta.

LITERATURA

- [1] BOJARSKI A., JELEŃSKI J., JELONEK M., LITEWKA T., WYŻGA B., ZALEWSKI J., *Zasady dobrej praktyki w utrzymaniu rzek i potoków górskich*, Ministerstwo Środowiska, Departament Zasobów Wodnych, Warszawa 2005.
- [2] OSMAN AKAN A., *Open Channel Hydraulics*, 2006.
- [3] DĄBKOWSKI S. L., PACHUTA K., *Roślinność i hydraulika koryt zarośniętych*. Wydawnictwo MUZ. Falenty 1996.
- [4] HAGER W.H., *Gauckler and the GMS Formula*, Journal of Hydraulic Engineering 2001.
- [5] KUBRAK E., *O obliczaniu przepustowości koryt rzecznych*, Inżynieria i Kształtowanie Środowiska 2005.
- [6] KUBRAK J., NACHLIK E. *Hydrauliczne podstawy obliczania przepustowości koryt rzecznych*, Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2003.
- [7] WYSOCKI T., *Pomiary geodezyjne*, Operat techniczny z wykonania przekrojów dolinowych oraz pomiarów przepustów drogowych, Gdańsk 2013.

- [8] SZYDŁOWSKI M. (red.), *Charakterystyka hydrologiczna zlewni Potoku Strzyża. Model hydrologiczny opad – odpływ*, Załącznik do raportu z realizacji projektu badawczo – rozwojowego pt.: Monitorowanie, modelowanie i analiza zagrożenia powodziowego w małej zlewni miejskiej na przykładzie zlewni Potoku Strzyża w Gdańsku, PG, Gdańsk 2012.

FLOW CAPACITY OF SMALL SURFACE STREAMS IN URBAN AREAS

Due to the intense urbanization rainwater is being thrown to receivers faster, which are usually local small streams. Due to this we observe greater flows in rivers and rapid spate. However, the flow capacity of them remains constant. Because most of streams were created as a result of natural processes or are structures built many years ago, are often not able to take the whole rainwater. The correct definition of stream flow capacity requires a detailed and careful analysis, it is important to properly locate the sections that may be crucial for flood risk. Due to the length of processes in which rivers were created and human interference, the shape and character of channels in urban areas are characterized by the extremely high diversity and therefore it is especially important to use appropriate methods for the analysis of its individual parts. In this elaboration there is a preliminary analysis of flow capacity on the example of the stream Strzyża in Gdansk, was made to determine which sections of the watercourse should undertake detailed calculations. There were calculated flow capacity for specially selected intersections and were compared with authoritative flows to make correct interpretation of the results. As a final summary of the results of calculation and inspection there was pre-determined the way of further analysis of flow capacity of channel and determined which of the sections may be considered sensitive.