

Wpłynęło 20.03.2015 r.
Zrecenzowano 26.08.2015 r.
Zaakceptowano 09.09.2015 r.
A – koncepcja
B – zestawienie danych
C – analizy statystyczne
D – interpretacja wyników
E – przygotowanie maszynopisu
F – przegląd literatury

TYPOWY HYDROGRAM PRZEPIŁYWU DO WYZNACZANIA WEZBRAŃ HIPOTETYCZNYCH

Wiesław GADEK^{ABCDEF}

Politechnika Krakowska, Instytut Inżynierii i Gospodarki Wodnej

Streszczenie

W naszym kraju jest stosowanych kilka metod wyznaczania fal hipotetycznych w zlewniach kontrolowanych. Najmniej rozpropagowana jest metoda Hydroprojektu, opracowana w ramach Centralnego Programu Badawczo-Rozwojowego CPBR 11.10 Gospodarka Wodna w 1989 r. W metodzie tej fale hipotetyczne są wyznaczane na podstawie rzeczywistych wezbrań zarejestrowanych w przekroju wodowskazowym. Dla fazy wznoszenia i opadania wezbrania, które są traktowane niezależnie od siebie, wykorzystuje się generator liczb losowych z zakresu $[-0,1; 0,2]$. Umożliwia to uzyskanie różnych przebiegów czasowych wyznaczanych wezbrań hipotetycznych. W artykule poddano ocenie wyniki uzyskane tą metodą i porównano je z wartościami uzyskanymi metodą krakowską, przy założeniu, że hydrogramem wzorcowym w metodzie Hydroprojektu jest tzw. hydrogram typowy.

Analizy porównawcze przeprowadzono dla objętości zredukowanej, czyli objętości fali liczonej powyżej przepływu bazowego $Q_{50\%}$. Porównano wezbrania hipotetyczne wyznaczone na podstawie danych z 24 zlewni leżących na obszarze górnej Wisły, o różnych powierzchniach i różnym charakterze: górskim, pogórskim, wyżynnym i nizinnym. Analizy wypadły niepomyślnie dla metody Hydroprojektu. Podobnie jak w przypadku innych metod, w których podstawą wyznaczania fali hipotetycznej jest jedno wezbranie, objętość wyznaczonej fali hipotetycznej i czasy wznoszenia w większości przypadków odbiegają od przeciętnych wartości wyznaczonych metodą krakowską. Metoda Hydroprojektu, w której wykorzystuje się typowe hydrogramy, może być stosowana w przypadku potwierdzenia, że tego typu hydrogramy zostały zarejestrowane na danym wodowskazie. Jednym z kryteriów może być zastosowanie opracowanej w Instytucie Inżynierii i Gospodarki Wodnej Politechniki Krakowskiej „formuły na objętość” dla zlewni niekontrolowanej.

Słowa kluczowe: czas wznoszenia, fala hipotetyczna, formuła na objętość, hydrogram typowy, metoda Hydroprojektu, metoda krakowska, objętość zredukowana

WSTĘP

Wezbrania hipotetyczne (nazywane również falami lub hydrogramami teoretycznymi) stosowane są w gospodarce wodnej i różnią się od przepływów miarodajnych i kontrolnych tym, że zawierają dodatkowe informacje o przebiegu wezbrania, jego objętości, czasie wznoszenia do wartości maksymalnej i czasie opadania oraz czasie trwania wezbrania. Dzięki tym informacjom można przeprowadzać obliczenia transformacji wezbrania w korycie cieku lub przez zbiornik retencyjny, z uwzględnieniem jego parametrów, np. pojemności [TWARÓG 2005]. Obecnie są stosowane w ocenie szeroko rozumianego ryzyka powodziowego [APEL i in. 2006; TWARÓG 2008; VRIJLING i in. 1998], do szacowania zarówno ryzyka przestrzennego [ERNST i in. 2010], jak i strat w życiu i mieniu [JONKMAN i in. 2008]. Z roku na rok zakres stosowności tego typu fal poszerza się. Zagadnienia niżówek i suszy nadal nie doczekały się podobnych rozwiązań, a ich negatywne skutki są podobne [TOKARCZYK, SZALIŃSKA 2013].

Metody wyznaczania wezbrań hipotetycznych w zlewniach kontrolowanych są stosunkowo liczne, brak jest natomiast takich metod dla zlewni niekontrolowanych. Podejmowane są próby wykorzystania w tym celu modeli hydrologicznych [GADEK i in. 2012; PIETRUSIEWICZ 2014; WAŁĘGA 2013]. W takich rozwiązaniach zakłada się, że prawdopodobieństwo maksymalnego opadu 24-godzinnego jest takie samo jak odpływu z modelowanej zlewni. Problemy, które nie są do końca poprawnie rozwiązane to: stosowanie opadu dobowego zamiast 24-godzinnego, z uwagi na brak odpowiednich danych oraz brak zasad wyznaczania hietogramu opadu o zadanym prawdopodobieństwie przewyższenia [BANASIK 2009; SZALIŃSKA, OTOP 2012; WYPYCH i in. 2014]. Nie jest też sprecyzowane dla jakiej maksymalnej powierzchni zlewni można stosować tego typu metody. Być może rozwiązaniem jest zastosowanie integralnych modeli hydrologicznych o parametrach rozłożonych [DOWNER i in. 2000; GADEK 2002; GADEK, NACHLIK 2001; OZGA-ZIELIŃSKA i in. 2002] lub uzupełnienie modelu hydrologicznego typu „opad – odpływ” modelem hydrodynamicznym bądź hydrologicznym, uwzględniającym transformację przepływu w korycie rzeczonym, umożliwiające uzyskanie modelu o parametrach częściowo rozłożonych. Konkludując, brak jest współcześnie opracowanych metod wyznaczania przepływów maksymalnych o zadanym prawdopodobieństwie przewyższenia [BANASIK i in. 2012]. Po wyeliminowaniu lub ograniczeniu przedstawionych zastrzeżeń modelowanie hydrologiczne, jako metoda wyznaczania wezbrań hipotetycznych, ma szansę stać się metodą wiodącą.

Obecnie w naszym kraju są stosowane dwa podejścia do wyznaczania wezbrań hipotetycznych dla zlewni kontrolowanych. Są one wyznaczane na podstawie:

- jednego wezbrania zarejestrowanego w przekroju wodowskazowym;
- uśrednionego wezbrania, wyznaczonego na podstawie kilku zarejestrowanych hydrogramów.

Do pierwszej grupy można zaliczyć: metodę Reitza i Krepsa z 1945 r. [GADEK, ŚRODULA 2014a], dwie metody STRUPCZEWSKIEGO [1964] i – zbliżoną sposobem wyznaczania teoretycznego przebiegu fali – metodę MCENROE [1992]. Natomiast do drugiej grupy należy zaliczyć: metodę Politechniki Warszawskiej [GADEK 2012 a], która wymaga co najmniej 6 jednomodalnych największych zarejestrowanych wezbrań, i metodę krakowską, która wykorzystuje w obliczeniach co najmniej 8 jednomodalnych hydrogramów [GADEK 2010; 2012a].

Autorem metody Hydroprojektu [GADEK, ŚRODULA 2014b], której datę powstania przyjmuje się na 1989 r., jest – według prof. Byczkowskiego – Roman Zdanowski. Różni się ona od wymienianych wyżej tym, że wykorzystuje w obliczeniach jedno wezbranie wybrane na podstawie jednego spośród trzech kryteriów. Jest to zatem metoda, która korzysta z jednego hydrogramu, czyli należy go grupy pierwszej, lecz wybór tego hydrogramu jest dokonywany na podstawie analizy kilku wezbrań, co zbliża ją do metod grupy drugiej. Niezależnie od metody dane wykorzystywane do obliczeń powinny być zarejestrowane w systemie wodowskazowym lub telemetrycznym. Dane systemu limnigraficznego nie powinny być stosowane z uwagi na uśrednienia stanu wody [GADEK 2014a].

Celem niniejszej publikacji jest określenie zasad wyznaczania typowego hydrogramu przepływu na potrzeby metody Hydroprojektu, służącej do wyznaczania wezbrań hipotetycznych, oraz oceny tej metody na podstawie porównania uzyskanych wyników z wartościami obliczonymi metodą krakowską.

KRÓTKI OPIS METODY HYDROPROJEKTU

Metodę Hydroprojektu, służącą do wyznaczania fal hipotetycznych, opracowano w ramach Centralnego Programu Badawczo-Rozwojowego CPBR 11.10 „Gospodarka Wodna” [GADEK, ŚRODULA 2014b; Hydroprojekt 1989]. W metodzie tej zakłada się maksymalne dopasowanie hydrogramu teoretycznego do rzeczywistych zarejestrowanych wezbrań. Założenie to jest realizowane poprzez wybór, ze zbioru historyczne zarejestrowanych wezbrań o podobnym charakterze i tej samej genezie (np. wezbrania jednomodalne lub wielomodalne, opadowe lub roztopowe itp.), tzw. fali wzorcowej (hydrogramu typowego). Wybór ten powinien być przeprowadzony na podstawie przynajmniej jednego z trzech kryteriów:

- najwyższego przepływu w kulminacji wezbrania rzeczywistego;
- przepływu maksymalnie zbliżonego do maksymalnego zadanego dla fali hipotetycznej;
- typowego kształtu wezbrania rzeczywistego.

Część wznosząca hydrogramu hipotetycznego i część opadająca są wyznaczone w sposób niezależny, z wykorzystaniem generatora liczb losowych z przedziału $[-0,1; 0,2]$, który umożliwi modyfikację czasową przebiegu fali hipotetycznej w stosunku do przebiegu rzeczywistego.

Dla części wznoszącej współrzędne czasowe są obliczane z zależności:

$$t_{w_i}^h = t_{w_i} (1 + G_1 \frac{Q_{maxp\%}}{Q_{max}}) \quad (1)$$

gdzie:

- $t_{w_i}^h$ = współrzędne czasowe fali hipotetycznej w części wznoszącej, h;
- t_{w_i} = współrzędne czasowe części wznoszącej wzorcowego wezbrania rzeczywistego, h;
- G_1 = liczba losowa z przedziału $[-0,1; 0,2]$ ustalana na podstawie niezależnych losowań, z zastosowaniem generatora liczb losowych, dla części wznoszącej wezbrania hipotetycznego;
- $Q_{maxp\%}$ = przepływ maksymalny o zadanym prawdopodobieństwie przewyższenia dla fali hipotetycznej, $m^3 \cdot s^{-1}$;
- Q_{max} = przepływ maksymalny wzorcowej fali rzeczywistej, $m^3 \cdot s^{-1}$;
- i = kolejne współrzędne czasowe.

Wartości przepływu dla części wznoszącej wyznacza formuła:

$$Q_{w_i}^h = Q_0^w + \frac{Q_{maxp\%} - Q_0^w}{Q_{max} - Q_0^w} (Q_{w_i} - Q_0^w) \quad (2)$$

gdzie:

- $Q_{w_i}^h$ = wartości przepływu części wznoszącej fali hipotetycznej wyznaczone współrzędnymi czasowymi $t_{w_i}^h$, $m^3 \cdot s^{-1}$;
- Q_0^w = wartości przepływu początkowego części wznoszącej wzorcowego wezbrania rzeczywistego, $m^3 \cdot s^{-1}$;
- Q_{w_i} = wartości przepływu wzorcowego wezbrania rzeczywistego o współrzędnej czasowej t_{w_i} , $m^3 \cdot s^{-1}$.

Współrzędne czasowe i wartości przepływu części opadającej są wyznaczane w podobny sposób:

$$t_{o_i}^h = t_{o_i} (1 + G_2 \frac{Q_{maxp\%}}{Q_{max}}) \quad (3)$$

gdzie:

- $t_{o_i}^h$ = współrzędne czasowe fali hipotetycznej w części opadającej, h;
- t_{o_i} = współrzędne czasowe w części opadającej wzorcowego wezbrania rzeczywistego, h;
- G_2 = liczba losowa z przedziału $[-0,1; 0,2]$, ustalana na podstawie niezależnych losowań, z zastosowaniem generatora liczb losowych, dla części opadającej wezbrania hipotetycznego.

$$Q_{o_i}^h = Q_0^o + \frac{Q_{\max p\%} - Q_0^o}{Q_{\max} - Q_0^o} (Q_{w_i} - Q_0^o) \quad (4)$$

gdzie:

$Q_{o_i}^h$ = wartości przeływu części opadającej fali hipotetycznej wyznaczone współrzędnymi czasowymi $t_{o_i}^h$, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$;

Q_0^o = wartości przeływu końcowego części opadającej wzorcowego wezbrańia rzeczywistego, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

SYNTETYCZNY OPIS METODY KRAKOWSKIEJ

Metodę krakowską opracowano w Zakładzie Hydrologii Instytutu Inżynierii i Gospodarki Wodnej Politechniki Krakowskiej w 2010 r. [GADEK 2010; 2012a]. W metodzie tej do wyznaczenia hydrogramu hipotetycznego wymagane jest wykorzystanie co najmniej 8 dużych jednomodalnych wezbrań, które są później zamieniane na znormalizowane hydrogramy jednostkowe. W przyjętym bezwymiarowym hydrogramie wysokość przeływu maksymalnego pomniejszonego o $Q_{50\%}$ jest przyjmowana jako 1, a znormalizowane współrzędne czasowe t_i mieszczą się w przedziale od 0 do 2, przy czym od 0 do 1 dla części wznoszącej, a od 1 do 2 dla części opadającej wezbrańia. Szczegóły dotyczące metody krakowskiej są podane w publikacjach GĄDKA [2010; 2012a, b].

KRÓTKA CHARAKTERYSTYKA WYBRANYCH ZLEWNI

Obliczenia porównawcze wykonano na podstawie danych z 24 wodowskazów zlokalizowanych na obszarze zlewni górnej Wisły. Wybrane zlewnie reprezentują obszary o różnych powierzchniach i topografiach. Starano się, by zlewnie były reprezentatywne dla wszystkich regionów tego obszaru, czyli: górskich i podgórskich, wyżynnych oraz nizinnych. Ich krótką charakterystykę przedstawiono w tabeli 1., w której zlewnie usystematyzowano według wielkości powierzchni.

Iloraz przeływu $IQ_{p\%}$ obliczono jako:

$$IQ_{p\%} = \frac{Q_{1\%}}{Q_{50\%}} \quad (5)$$

gdzie:

$IQ_{p\%}$ = iloraz maksymalnych przeływów rocznych o prawdopodobieństwie przewyższenia $p = 1\%$ i $p = 50\%$;

$Q_{1\%}, Q_{50\%}$ = maksymalny przeływ roczny o prawdopodobieństwie przewyższenia $p = 1\%$ i $p = 50\%$, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Tabela 1. Krótka charakterystyka zlewni wybranych do obliczeń porównawczych**Table 1.** Short characteristics of the catchments selected for the comparative calculations

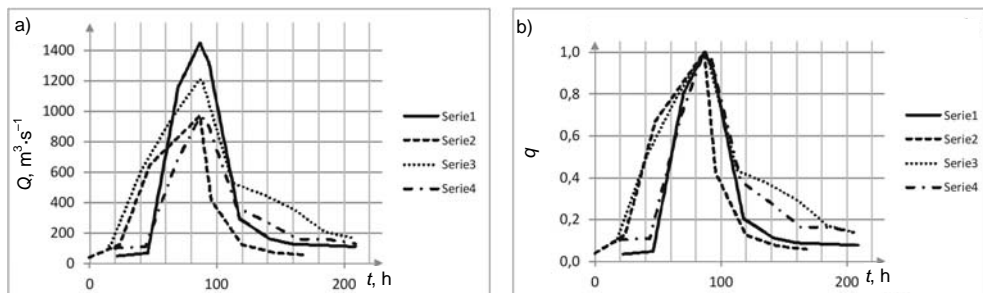
Rzeka – wodowskaz River – water gauge	Powierzchnia zlewni, km ² Catchment area, km ²	$IQ_{p\%}$
Lubieńka – Lubień	46,9	5,6
Bystra – Kamesznica	48,2	5,0
Grajcarek – Szczawnica	73,6	6,4
Wisłok – Puławy Dolne	131	5,6
Wieprzówka – Rudze	154	3,8
Jasiołka – Jasło	164	3,6
Uszwica – Borzęcin	265	5,3
Wisła – Skoczów	297	6,3
Ośława – Szczawne	302	3,2
Raba – Kasinka	353	5,9
Skawa – Sucha Beskidzka	468	4,6
Czarna – Staszów	571	4,7
Raba – Stróża	644	5,0
Dunajec – Nowy Targ-Kowaniec	681	4,7
Czarna Nida – Morawica	755	4,7
Skawa – Wadowice	835	4,3
Raba – Proszówki	1 470	4,9
Przemsza – Jeleń	2 006	2,1
Poprad – Stary Sącz	2 071	4,1
San – Przemyśl	3 686	3,4
Wisłoka – Mielec	3 893	3,1
Dunajec – Nowy Sącz	4 341	5,8
San – Radomyśl	16 824	2,8
Wisła – Sandomierz	31 847	4,0

Źródło: obliczenia własne. Source: own study

METODYKA BADAŃ

Stosowane w metodzie Hydroprojektu określenie „typowy hydrogram” jest trudne do jednoznacznego zdefiniowania. Powodem tego jest niepowtarzalność każdego rzeczywistego wezbrania pod względem przepływu maksymalnego, czasu trwania, przebiegu itp. (rys. 1a). Częściowo problem ten można rozwiązać poprzez unifikację. W tym przypadku taką unifikację można wykonać ze względu na wartości przepływu (rys. 1b). Zunifikowany hydrogram przyjmuje wartość 1 dla przepływu maksymalnego, a pozostałe wartości są określone z zależności:

$$q_i = \frac{Q_i}{Q_{max}} \quad (6)$$



Rys 1. Hydrogramy przepływu dla przykładowego przekroju wodowskazowego; a) rzeczywiste, b) zunifikowane; źródło: wyniki własne

Fig. 1. Discharge hydrographs for an example water-gauged cross-section; a) real, b) unified discharge hydrographs; source: own study

gdzie:

- q_i = jednostkowy przepływ w i -tym kroku czasowym;
- Q_i = przepływ w i -tym kroku czasowym, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$;
- Q_{\max} = przepływ maksymalny wezbrania, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

W metodzie Hydroprojektu brak jest definicji wezbrania, co skutkuje tym, że początkowa wartość przepływu może być inna niż końcowa (rys. 1). Do celów obliczeń porównawczych przyjęto zasadę, że wezbrania będą rozpatrywane podobnie jak w metodzie krakowskiej, czyli dla przepływów $Q_{50\%}$. Hydrogramy zunifikowane będą wyznaczone według formuły:

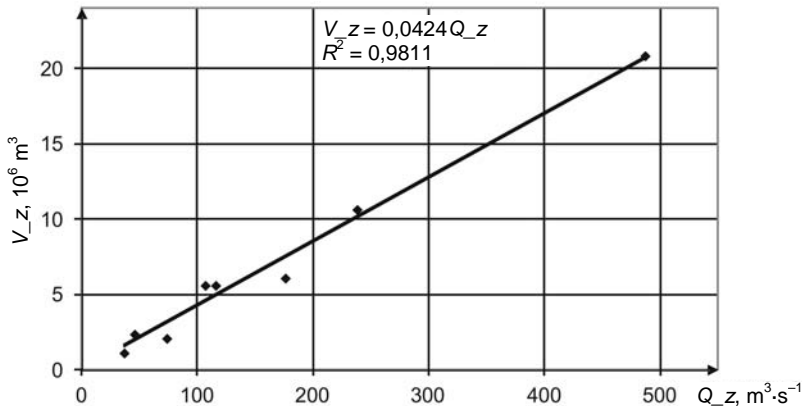
$$q_i = \frac{Q_i - Q_{50\%}}{Q_{\max} - Q_{50\%}} \quad (7)$$

gdzie:

- $Q_{50\%}$ = przepływ o prawdopodobieństwie przewyższenia $p = 50\%$, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Głównym założeniem metody Hydroprojektu jest stosowanie generatora liczb losowych do uzmiennienia przebiegów czasowych wyznaczonych wezbrań hipotetycznych. Z uwagi na to, że poszukiwana jest procedura wyboru typowego hydrogramu, generatory zostały wyłączone.

Do analizy wytypowano zarejestrowane na każdym wodowskazie cztery największe jednomodalne wezbrania, które zunifikowano ze względu na wartości przepływów. Jako maksymalny przepływ hipotetyczny przyjęto $Q_{1\%}$. Obliczone na podstawie tak wyznaczonych hydrogramów objętości zredukowane porównano z wartościami określonymi z zależności stosowanej w metodzie krakowskiej (rys. 2) oraz z wynikami uzyskanymi z zastosowaniem „formuły na objętość” [GADEK 2014 b].



Rys. 2. Zależność objętości zredukowanej V_z od przepływu zredukowanego Q_z ;
źródło: wyniki własne

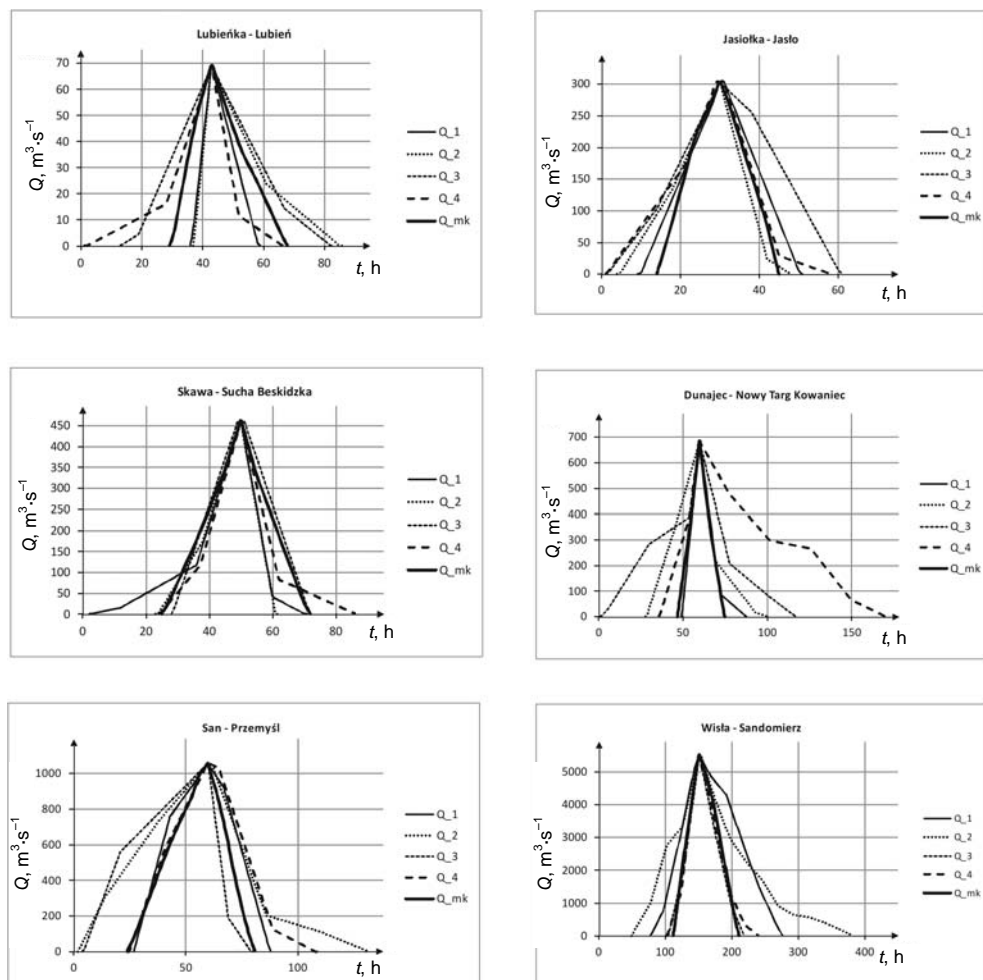
Fig. 2. Relationship between the reduced volume V_z and the reduced discharge Q_z ;
source: own results

WYNIKI BADAŃ

Na rysunku 3. przedstawiono przykładowe hydrogramy hipotetyczne dla sześciu wybranych wodowskazów wyznaczone metodą Hydroprojektu przy wyłączonym generatorze liczb losowych (wezbrania od Q_1 do Q_4) oraz falę hipotetyczną według metody krakowskiej Q_{mk} .

Wyniki obliczeń potwierdziły, że każde wezbranie jest odmienne i trudno bez odpowiedniego kryterium zakwalifikować je do grupy odpowiednich lub niewłaściwych do przyjęcia za wzorzec, na podstawie którego można wyznaczyć falę hipotetyczną metodą Hydroprojektu. Tylko w przypadku jednego wodowskazu (tab. 2) każde z czterech wytypowanych wezbrań spełnia kryterium oczekiwanej objętości zredukowanej (wodowskaz Sucha Beskidzka na rzece Skawie). W przypadku pięciu wodowskazów objętości fal hipotetycznych obliczone metodą Hydroprojektu odbiegają od wartości określonych metodą krakowską, przy założonym dopuszczalnym odchyleniu 30%. Oznacza to, że żadne z zarejestrowanych wezbrań nie powinno być wykorzystane jako hydrogram wzorcowy w metodzie Hydroprojektu. Potwierdza się, że największe zarejestrowane wezbranie nie zawsze może być uważane za „typowe”. Tylko w trzynastu przypadkach tego typu wezbranie spełnia warunek dobrze określonej objętości. Wynika z tego, że wystąpienie wezbrania o hydrogramie typowym w warunkach rzeczywistych jest mało realne. Bez dokładnego sprecyzowania jakie kryteria mają być spełnione powinno się unikać tego sformułowania w opisie metody.

Problem wyboru odpowiedniego wzorca fali w metodzie Hydroprojektu jest podstawnym zagadnieniem, które powinno być rozwiązane. Rozwiązuje to w dużej



Rys. 3. Przykładowe przebiegi fal hipotetycznych dla sześciu wodowskazów opracowane na podstawie czterech zarejestrowanych największych wezbrań jednodalnych (usystematyzowane od największego przepływu maksymalnego wezbrania Q_1 do najmniejszego Q_4) w odniesieniu do fali hipotetycznej obliczonej metodą krakowską Q_{mk} ; źródło: wyniki własne

Fig. 3. Example courses of the design waves for six water gauges made on the basis of four recorded largest unimodal floods (ordered from the biggest flow of the peak flood Q_1 to the smallest one Q_4) with reference to the design wave calculated with the Cracow method Q_{mk} ; source: own study

mierze „formuła na objętość”, która umożliwia wyznaczenie objętości zredukowanej. Mając taką wartość, można dokonać wyboru odpowiedniego hydrogramu wzorcowego. Formułę wyznaczono dla zlewni o powierzchni do 400 km^2 . Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że jej zakres może być poszerzony do 1000 km^2 . Wartości obliczone dla zlewni o większych powierzchniach są zaniżone.

Tabela 2. Objętości zredukowane: czterech fal hipotetycznych wyznaczonych dla przepływu maksymalnego $Q_{1\%}$ na podstawie największych wezbrań zarejestrowanych w danym wodowskazu (od V_1 do V_4), wezbrania hipotetycznego wyznaczonego metodą krakowską (V_{mk}) i wezbrania obliczonego wg „formuły na objętość” (V_{form})

Table 2. Reduced discharges: of four design waves determined for the peak flow $Q_{1\%}$ based on the biggest floods recorded on a given water gauge (from V_1 to V_4), of the design flood determined with the Cracow method (V_{mk}) and of the flood calculated from „formula for volume” (V_{form})

Rzeka – wodowskaz River – water gauge	Objętość wezbrania, 10^6 m^3 Flood volume, 10^6 m^3					
	V_1	V_2	V_3	V_4	V_{mk}	V_{form}
Lubieńka – Lubień	2,7	4,8	7,2	4,7	4,7	3,8
Bystra – Kamesznica	3,5	6,8	9,7	4,5	2,4	2,2
Grajcarek – Szczawnica	5,2	3,9	7,1	8,7	3,9	3,8
Wisłok – Puławy Dolne	12,8	15,7	13,5	16,2	8,0	13,2
Wieprzówka – Rudze	12,7	8,6	10,6	17,1	8,8	9,5
Jasiołka – Jasło	19,9	22,5	32,5	24,1	18,4	18,2
Uszwica – Borzęcin	42,8	30,4	38,5	64,4	33,0	22,0
Wisła – Skoczów	26,7	46,8	43,3	71,2	29,4	33,0
Ośława – Szczawne	12,5	14,3	13,6	21,6	11,9	12,3
Raba – Kasinka	19,2	26,5	42,8	28,7	18,9	29,0
Skawa – Sucha Beskidzka	30,4	27,3	37,7	31,3	35,8	29,9
Czarna – Staszów	17,0	40,7	22,4	27,9	18,5	12,3
Raba – Stróża	43,2	52,3	64,0	95,8	29,4	45,0
Dunajec – Nowy Targ-Kowaniec	32,4	62,6	97,5	135,0	32,0	45,4
Czarna Nida – Morawica	23,7	24,7	22,8	38,7	21,9	10,8
Skawa – Wadowice	57,9	56,2	62,4	25,0	41,4	50,8
Raba – Proszówki	251,0	227,0	110,0	200,0	119,0	94,2
Przemsza – Jeleń	12,2	18,8	12,8	19,4	7,4	3,7
Poprad – Stary Sącz	115,0	165,0	68,5	75,9	73,4	57,3
San – Przemyśl	136,0	201,0	153,0	145,0	111,0	77,9
Wisłoka – Mielec	111,0	121,0	115,0	212,0	95,6	70,9
Dunajec – Nowy Sącz	447,0	313,0	569,0	366,0	352,0	229,0
San – Radomyśl	265,0	293,0	257,0	379,0	226,0	110,0
Wisła – Sandomierz	1 960,0	2 290,0	980,0	1 050,0	1 040,0	459,0

Objaśnienia: wartości wytłuszczone oznaczają, że obliczona objętość zredukowana wezbrania hipotetycznego wyznaczonego metodą Hydroprojektu jest zgodna z wartością obliczoną dla fali opracowanej metodą krakowską, przy założonym maksymalnym odchyleniu do 30% objętości.

Explanations: values in bold mean that the calculated reduced discharge of design wave determined with the Hydroprojekt method agrees with the value calculated for the wave determined with the Cracow method at assumed deviation of up to 30% volume.

Źródło: wyniki własne. Source: own study.

Proponowana „formuła na objętość” ma postać [GADEK 2014b]:

$$V_{zred} = (Q_{maxp\%} - Q_{50\%}) 0,0044 \ln(A) + 0,0377 \quad (8)$$

gdzie:

- V_{zred} = objętość zredukowana wezbrania hipotetycznego, 10^{-6} m^3 ;
- $Q_{maxp\%}$ = przepływ maksymalny o prawdopodobieństwie przewyższenia p mniejszym niż 20%, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$;
- $Q_{50\%}$ = przepływ maksymalny o prawdopodobieństwie przewyższenia $p = 50\%$, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$;
- A = powierzchnia zlewni, od 10 do 1000 km^2 .

Formuła ta, jak wykazały przeprowadzone testy, może być również stosowana w zlewniach dorzecza Odry o powierzchniach nie większych niż 1000 km^2 .

PODSUMOWANIE

Zaletami metody Hydroprojektu jest wyznaczanie fali hipotetycznej z uwzględnieniem zarejestrowanego rzeczywistego wezbrania oraz wprowadzenie zmienności przebiegu fali hipotetycznej z wykorzystaniem generatora liczb losowych. Zakres stosowalności fal wyznaczonych w ten sposób powiększa się o badanie czułości rozpatrywanego systemu na zadawany impuls wejściowy, jakim jest fala hipotetyczna. Aby można było z tego w pełni skorzystać, konieczne jest poprawne wyznaczenie fali hipotetycznej według proponowanych zasad.

Przeszkodą w wyborze odpowiedniego rzeczywistego hydrogramu, jako wzorca w tej metodzie, jest brak jasno sformułowanego kryterium. Przepływy maksymalne zarejestrowanych wezbrań przeważnie są niższe aniżeli konstruowanych fal hipotetycznych na obszarze górnej Wisły, trudno jest zatem określić, które spośród nich są reprezentatywne, a które nie. Przyjęcie wezbrania zbliżonego pod względem maksymalnego przepływu do przepływu zadanego dla fali hipotetycznej oraz fali o największym maksymalnym przepływie jest trudne do realizacji, z uwagi na to, że nie zawsze fale te dają odpowiednią objętość zredukowaną, co pokazała ocena wyboru hydrogramu wzorcowego. Ze względu na brak jednoznacznego sprecyzowania co to są „hydrogramy typowe” dokonany wybór może dotyczyć niewłaściwego wskazania lub interpretacji tego pojęcia. Proponuje się, by „typowość” wezbrania ustalano na podstawie oczekiwanej lub obliczonej niezależnie objętości wezbrania wzorcowego. Jako narzędzie wspomagające decyzję wyboru można zastosować „formułę na objętość”. Uzyskane za jej pomocą wartości objętości można wykorzystać w zlewni o powierzchni do 1000 km^2 . W przypadku większych zlewni wybierając hydrogram, należy się kierować zasadą najmniejszej różnicy objętości zredukowanej między wybranym hydrogramem a wartością obliczoną za pomocą formuły. Taka sama zasada powinna obowiązywać w przypadku, gdy dla

zlewni do 1000 km² uzyskujemy negatywną odpowiedź z wybranych hydrogramów. Należy przy tym pamiętać, że porównań dokonujemy dla zunifikowanych pod względem przepływu hydrogramów i wyznaczonych na ich podstawie hydrogramów hipotetycznych.

LITERATURA

- APEL H., THIEKEN A.H., MERZ B., BLÖSCHL G. 2006. A probabilistic modelling system for assessing flood risks. *Natural Hazards*. Vol. 38 s. 295–308.
- BANASIK K. 2009. Wyznaczanie wezbrań powodziowych w małych zlewniach zurbanizowanych. Warszawa. Wydaw. SGGW. ISBN 978-83-75831-56-6 ss. 27.
- BANASIK K., BYCZKOWSKI A., HEJDUK L., GŁADECKI J. 2012. Obliczanie przepływów maksymalnych rocznych o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia w małej zlewni z zastosowaniem metod statystycznych oraz metod pośrednich. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*. T. 12. Z. 3 (39) s. 17–26.
- DOWNER C.W., JOHNSON B.E., OGDEN F.L., MESELHE E.A. 2000. Advances in Physically Based Hydrologic Modeling with CASC2D. *Proceedings of Watershed Management and Operations Management*. Vol. 105 ss. 48.
- ERNST J., DEWALS B.J, DETREMBLEUR S., ARCHAMBEAU P. 2010. Micro-scale flood risk analysis based on detailed 2D hydraulic modelling and high resolution geographic data *Natural hazards*. *Natural Hazards*. Vol. 55 s. 181–209.
- GĄDEK W., NACHLIK E. 2001. Przestrzenna analiza zagrożenia powodziowego na przykładzie zlewni Górnej Soły. Wizualizacja integralnego systemu transformacji opadu w odpływ (WISTOO) – podstawy i aplikacje w ocenie zagrożenia powodziowego. *Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej PAN*. Z. 18 s. 70–118.
- GĄDEK W. 2002. Matematyczny model odpływu ze zlewni z zastosowaniem zdekomponowanej przestrzennie siatki obliczeniowej. *Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej*. Nr 49. ISSN 0137-1363 ss. 134.
- GĄDEK W. 2010. Fale hipotetyczne o zadanym prawdopodobieństwie przepływu w kulminacji. W: *Hydrologia w inżynierii i gospodarce wodnej*. T. 1. Warszawa. Komitet Inżynierii Środowiska PAN. Monografia. Nr 68 s. 177–186.
- GĄDEK W. 2012a. Wyznaczanie wezbrań hipotetycznych metodą Politechniki Warszawskiej i metodą Politechniki Krakowskiej w zlewniach kontrolowanych. Cz. 1. Opis metod. *Czasopismo Techniczne*. Z. Ś-2 s. 95–104.
- GĄDEK W. 2012b. Wyznaczanie wezbrań hipotetycznych metodą Politechniki Warszawskiej i metodą Politechniki Krakowskiej w zlewniach kontrolowanych. Cz. 2. Ocena metod. *Czasopismo Techniczne*. Z. Ś-2 s. 105–126.
- GĄDEK W., BANACH W., FIOŁKA I. 2012. Zastosowanie modelu geomorfologicznego do wyznaczania wezbrań hipotetycznych w zlewniach niekontrolowanych. *Czasopismo Techniczne*. Z. Ś-1. s. 59–67.
- GĄDEK W. 2014a. Assessment of limnigraph data usefulness for determining the hypothetical flood waves with the Cracow method. *Journal of Water and Land Development*. No. 21 s. 71–78.
- GĄDEK W. 2014b. Fale hipotetyczne dla zlewni niekontrolowanej. *Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej PAN*. Z. 20 s. 139–149.
- GĄDEK W., ŚRODULA A. 2014a. Ocena parametrów wezbrań hipotetycznych wyznaczonych metodą Reitza i Krepsa w zlewniach kontrolowanych. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*. T. 14. Z. 3 (47) s. 29–47.

- GADEK W., ŚRODULA A. 2014b. The evaluation of the design flood hydrographs determined with the Hydroproject method in the gauged catchments. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*. Nr 2014/IV (3 (Dec 2014)) s. 1355–1366.
- Hydroprojekt 1989. Centralny Program Badawczo-Rozwojowy. *Gospodarka Wodna*. Cel nr 3. Zadanie wdrożeniowe 3.3. Generowanie fal hipotetycznych dla potrzeb oceny efektów gospodarki przeciwpowodziowej. Nr arch. 17096-C/90.
- JONKMAN S.N., VRIJLING J.K., VROUWENVELDER A.C.W.M. 2008. Methods for the estimation of loss of life due to floods: a literature review and a proposal for a new method. *Natural Hazards*. Vol. 46 s. 353–358.
- MCENROE B. M. 1992. Sizing stormwater detention reservoirs to reduce peak flow. W: *Hydraulic engineering: saving a threatened resource – in search of solutions*. Conference Proceeding Paper. Reston VA. ASCE s. 719–724.
- NACHLIK E. (red.) 2001. *Wizualizacja integralnego systemu transformacji opadu w odpływ (WISTOO) – podstawy i aplikacje w ocenie zagrożenia powodziowego*. Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej PAN. Z. 18. ISSN 0867-7816 ss. 118.
- OZGA-ZIELIŃSKA M., GADEK W., KSIĄŻYŃSKI K., NACHLIK E., SZCZEPANEK R. 2002. Mathematical model of rainfall-runoff transformation – WISTOO. W: *Mathematical Models of Large Watershed Hydrology*. Pr. zbior. Red. V.P. Singh, D.K. Frevert. Littleton, Colorado. Water Resources Publications, LLC s. 811–860.
- PIETRUSIEWICZ I., CUPAK A., WAŁĘGA A., MICHAŁEC B. 2014. The use of NRCS synthetic unit hydrograph and Wackermann conceptual model in the simulation of a flood wave in an uncontrolled catchment. *Journal of Water and Land Development*. No. 23 s. 53–59.
- STRUPCZEWSKI W. 1964. Równanie fali powodziowej. *Wiadomości Służby Hydrologicznej i Meteorologicznej*. T. 2 (57) s. 35–58.
- SZALIŃSKA W., OTOP I. 2012. Ocena struktury czasowo-przestrzennej opadów z wykorzystaniem wybranych wskaźników do identyfikacji zdarzeń ekstremalnych. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*. T. 12. Z. 2 (38) s. 269–282.
- TWARÓG B. 2008. Elementy ryzyka i zarządzania bezpieczeństwem obiektów przeciwpowodziowych. *Czasopismo Techniczne*. Z. Ś-3 s. 143–159.
- TWARÓG B. 2005. Optymalna ochrona przed powodzią z uwzględnieniem ryzyka. *Gospodarka Wodna*. Nr 4 s. 137–142.
- VRIJLING J.K., VAN HENGEL W., HOUBEN R.J. 1998. Acceptable risk as a basis for design. *Reliability Engineering and System Safety*. Vol. 59 s. 141–150.
- TOKARCZYK T., SZALIŃSKA W. 2013. The operational drought hazard assessment scheme – performance and preliminary results. *Archives of Environmental Protection*. Vol. 39. No. 3 s. 61–77.
- WAŁĘGA A. 2013. Application of HEC-HMS programme for the reconstruction of a flood event in an uncontrolled basin. *Journal of Water and Land Development*. No 18 s. 13–20.
- WYPYCH A., USTRNUL Z., HENEK E. 2014. Meteorological Hazards – Visualization System for National Protection Against Extreme Hazards for Poland. *Meteorology Hydrology and Water Management*. Vol. 2. No. 1 s. 37–42.

Wiesław GADEK

TYPICAL DISCHARGE HYDROGRAPH FOR DETERMINING DESIGN FLOODS

Key words: *Cracow method, design wave, formula for volume, Hydroprojekt method, reduced volume, rising time, typical hydrograph*

S u m m a r y

There are several methods used in our country for determining design waves in the gauged catchments. The least popularised is the Hydroprojekt method, which was developed within the Central Programme for Research and Development CPBR 11.10 Water Management in 1989. The method assumes that the design waves are to be determined based on the actual registered flood waves in the water-gauged cross-section. It uses the random number generator from the range of $[-0.1; 0.2]$ for rising and declining phases of the flood that are treated independently of each other. It enables to obtain different time courses for the design floods to be determined. This article assesses the results obtained with this method compared to the values received from the Cracow's method, assuming that the standard hydrograph in the Hydroprojekt method is the so-called typical hydrograph.

The comparative analyses were conducted for the reduced volume i.e. for wave volume at the discharges exceeding the $Q_{50\%}$ discharge. The comparisons were done for 24 water gauges located in the Upper Vistula catchment in areas of different size and character: mountain, sub-mountain, upland and lowland. The analyses were unfavourable for the Hydroprojekt method. As with other methods, where the design wave is determined based on one flood wave, the design wave volume and the rising times were different from the average conditions determined with the Cracow method in most cases. The Hydroprojekt method using the standard hydrographs may be applied providing the hydrographs of this type were recorded in a given water gauge. One of the criteria may be the application of the "formula for volume" for non-gauged catchment developed in the Institute of Water Engineering and Water Management at the Cracow University of Technology.

Adres do korespondencji: dr hab. W. Gądek, prof. PK, Politechnika Krakowska, Instytut Inżynierii i Gospodarki Wodnej, ul. Warszawska 24, 30-155 Kraków; tel. +48 12-628-28-54, e-mail: wieslaw.gadek@iigw.pk.edu.pl