

**М.В. Захарова, к.г.н.**

*Одеський державний екологічний університет*

## **ОЦІНКА ТОЧНОСТІ РОЗРАХУНКІВ ГІДРОГРАФІВ ПАВОДКОВОГО СТОКУ НА ОСНОВІ МЕТОДА ВОДНИХ БАЛАНСІВ І МОДЕЛІ КІНЕМАТИЧНОЇ ХВИЛІ**

*У статті наводиться короткий опис методів розрахунку гідрографів паводкового стоку і проводиться оцінка результатів розрахунків за моделлю кінематичної хвилі і методом водних балансів.*

**Ключові слова:** *гідрограф, паводковий стік, кінематична хвиля, водний баланс.*

**Вступ.** В даний час обчислення гідрографів паводкового стоку в замикальному створі річкового басейну виконується за допомогою методів математичного моделювання процесів формування стоку. Однак більшість методів, що використовуються, є моделями стоку з зосередженими параметрами. Тому найбільшу цікавість являють собою моделі формування стоку з розподіленими параметрами, які враховують просторову неоднорідність опадів і фізико-географічних характеристик водозбору. Моделі стоку з розподіленими параметрами зазвичай складають на основі системи повних рівнянь гідродинаміки, вирішення яких є складною проблемою. Тому для масових розрахунків стоку з басейну звичайно використовуються два шляхи: або спрощення складних двовимірних систем рівнянь гідродинаміки, або застосування спеціальних прийомів для опису просторової форми стоку за допомогою одновимірних моделей [1,2]. Останній шлях використовувався в цьому дослідженні для розрахунків гідрографів паводків.

Метою статті є розрахунок гідрографів паводкового стоку на основі двох методів обчислення руслового стоку та оцінка точності одержаних результатів.

**Матеріали і методи дослідження.** Застосована в цьому дослідженні просторова модель формування паводкового стоку складається з блоків, які описують схиловий стік, водоутворення та русловий стік води. Розрахунок гідрографа схилового стоку проводився з використанням двохкомпонентної моделі кінематичної хвилі, яка описує найбільш складний вид стоку при наявності на поверхні схилу чохла пухкого матеріалу, що підстилається відносним водоупором. Обчислення водоутворення проводилося за різницею між інтенсивністю опадів і інфільтрацією води в ґрунт або відносний водоупор [3].

Для обчислення руслового стоку або ординат гідрографа паводка в одному випадку використовувалася наступна розрахункова формула, розроблена автором [2] на основі аналізу водних балансів для окремих ділянок руслової системи і переміщення об'ємів води по руслу з врахуванням динаміки швидкості добігання

$$Q_{j,i} = \sum_{l=1}^j \left[ v_{j,i} B(x_d) R_{j,l} \Delta t \sum_{k=1}^{n_d} q(x_d, y_k) / n_d \right], \quad (1)$$

де  $Q_{j,i}$  - витрата паводку в руслі в  $j$ -й інтервал часу  $\Delta t$  від початку паводка в  $i$ -му створі, м<sup>3</sup>/с;

$v_{j,i}$  - швидкість переміщення води по руслу в  $j$ -й інтервал часу  $\Delta t$  від початку паводка в  $i$ -му створі, м/с;

$n_d$  - кількість точок водозбору на еквідистанті  $B(x_d)$ , в яких визначається модуль стоку  $q(x_d, y_k)$ ;

$y_k$  - відстань по еквідистанті від одного з вододілів до місця визначення стоку  $q(x_d, y_k)$ , м;

$\Delta t$  - розрахунковий інтервал часу, с;

$B(x_d)$  - довжина руслової еквідистанти – лінії, що сполучає точки руслової системи, які стоять на відстані  $x_d$  від замикального створу, м;

$x_d$  - відстань, що пройдена водою до  $j$ -го інтервалу часу, яка обчислюється за формулою

$$x_d = \sum_{k=l}^j v_{k,j-k+1} \Delta t - 0.5 v_{j,i} \Delta t; \quad (2)$$

$R_{j,l}$  - коефіцієнт трансформації, який враховує вплив динаміки швидкості в часі і за довжиною русла на витрати паводка, що розраховується за наступною формулою

$$R_{j,l} = \prod_{k=l}^j r_{k,j-k+1}, \quad (3)$$

де параметр  $r$  враховує трансформацію паводка на одній ділянці русла і визначається за допомогою наступного виразу

$$r_{j,i} = 1 + \left( 1 - \frac{v_{j,i}}{v_{j,i+1}} \right) \frac{Q_{j,i+1}}{Q_{j,i}}, \quad (4)$$

де  $v_{j,i}$  - швидкість добігання води, що обчислюється за наступною формулою

$$v_{j,i} = a_p \left( \frac{1+l_p}{1+l_i} \right)^{0.25} I_{pi}^{0.33} Q_{j,i}^{0.33}, \quad (5)$$

де  $a_p$  - русловий параметр формули, що залежить від шорсткості та форми русла і встановлюється для замикального створу річки;

$l_p$  - повна довжина русла річки до  $i$ -го створу, м;

$l_i$  - відстань від витoku річки до  $i$ -го створу, м;

$I_{pi}$  - ухил русла в  $i$ -му створі, ‰.

В другому випадку динаміка руслового стоку або формування загальної витрати паводка через замикальний створ описувалися за допомогою рівняння кінематичної хвилі [4]

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial \omega}{\partial t} = n \cdot q'_{x,t} \quad \text{або} \quad \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{Q}{v} \right) = n \cdot q'_{x,t}, \quad (6)$$

де  $Q$  - витрата паводка, м<sup>3</sup>/с;  
 $q'_{x,t}$  - модуль стоку на одиницю ширини русла, м<sup>3</sup>/м·с;  
 $\omega$  - площа живого перерізу русла, м<sup>2</sup>;  
 $v$  - швидкість розповсюдження паводкових хвиль, м/с;  
 $n$  - кількість русел, пересічених еквідистантою у створі  $x$ , причому

$$n = \frac{1}{2 \cdot L_{cx}} \cdot B_x, \quad (7)$$

де  $B_x$  - ширина басейну по еквідистанті, м.

$L_{cx}$  - середня довжина схилу, м.

Тоді, рівняння (6) переписується у наступному вигляді

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{Q}{v} \right) = \frac{1}{2 \cdot L_{cx}} \cdot B_x \cdot q'_{x,t}. \quad (8)$$

Швидкість добігання води по руслу визначається в залежності від поточних значень витрати паводка й ухилу русла за формулою (5).

Для чисельного вирішення рівнянь склалися їх кінцево-різницеві аналоги, до яких застосовувалися ітераційні методи.

**Результати дослідження та їх аналіз.** В результаті обчислення гідрографів для 13 дощових паводків на малих водозборах Закарпатської воднобалансової станції за описаними методами з застосуванням діалогового методу оптимізації були одержані наступні показники якості розрахунків:

- відхилення обчисленої максимальної витрати від фактичної –  $\Delta Q_{\max}$ , %;
- відхилення обчисленого і фактичного шарів паводку –  $\Delta y$ , %;
- критерій якості, що показує ступінь відповідності обчисленого і спостереженого гідрографів –  $K$

$$K = \frac{S}{\bar{Q}_\phi}, \quad (9)$$

де  $\bar{Q}_\phi$  - середнє значення фактичної витрати паводка, м<sup>3</sup>/с.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Q_{i,\phi} - Q_{i,o})^2}{N}}, \quad (10)$$

де  $S$  - середня квадратична погрішність розрахунку гідрографа;

$Q_{i,o}$  – обчислена витрата паводка на  $i$ -й інтервал часу;

$Q_{i,\phi}$  – фактична витрата паводка на  $i$ -й інтервал часу;

$N$  – число ординат гідрографа паводку.

Для оцінки точності розрахунків використовувався також критерій якості методики, який встановлюється за відношенням  $\bar{S}/\sigma$ .

Порівняння гідрографів обчислених і фактичних значень річкового стоку показало їхній задовільний збіг відповідно до показників якості процесу обчислення (табл. 1).

Таблиця 1 – Основні показники якості процесу обчислення гідрографів паводкового стоку

№ п/п	Річка – пост	Дата паводка	$\Delta y$ , %	$\Delta Q_{\max}$ , %	$K$	$\bar{S}/\sigma$	$\Delta y$ , %	$\Delta Q_{\max}$ , %	$K$	$\bar{S}/\sigma$
			Метод водних балансів				Модель кінематичної хвилі			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	р. Лопушна – с. Лопушне(н)	11.06.67	-17.5	-7.16	0.35	0.56	13.5	-0.49	0.39	0.42
2	р. Лопушна – с. Лопушне(н)	04.08.72	-13.0	8.62	0.36	0.53	-20.6	-0.20	0.34	0.51
3	р. Лопушна – с. Лопушне(н)	16.07.00	7.94	-0.63	0.32	0.70	-14.8	10.2	0.21	0.45
4	р. Лопушна – с. Лопушне(н)	29.07.00	9.27	-1.82	0.42	0.79	-11.9	10.5	0.34	0.64
5	р. Пилипець – с. Пилипець	31.08.72	16.6	0.38	0.42	0.49	3.10	1.52	0.34	0.40
6	р. Студений – с. Н.Студений	13.05.70	17.6	2.22	0.39	0.54	1.10	0.00	0.18	0.25
7	р. Репінка – с. Репіне	31.08.72	9.22	-0.73	0.17	0.21	-5.70	-0.15	0.21	0.26
8	р. Ріка – смт Міжгір'я	11.06.67	-2.81	0.69	0.38	0.47	0.60	0.23	0.24	0.30
9	р. Ріка – смт Міжгір'я	08.06.69	-2.34	-7.97	0.32	0.44	-3.00	-1.02	0.14	0.20
10	р. Ріка – смт Міжгір'я	17.08.70	-10.6	-0.41	0.38	0.49	-10.2	0.82	0.30	0.39
11	р. Ріка – смт Міжгір'я	31.08.72	6.99	2.19	0.16	0.19	9.80	0.66	0.19	0.22
12	р. Ріка – смт Міжгір'я	29.07.73	3.98	-0.24	0.22	0.43	13.7	0.00	0.25	0.48
13	р. Голятинка – с. Майдан	28.06.02	-15.0	6.70	0.45	0.82	-35.9	1.09	0.41	0.59

**Висновки.** Осереднені значення величин  $\Delta Q_{\max}$  і  $\Delta y$  для гідрографів паводків, розрахованих за методом водних балансів, дорівнюють відповідно 0.14% і 0.80%, за допомогою моделі кінематичної хвилі – 1.78% і -4.6%. Осереднені значення величин  $K$  і  $\bar{S}/\sigma$  для гідрографів паводків, розрахованих за методом водних балансів, складають відповідно 0.33 і 0.51, за допомогою моделі кінематичної хвилі – 0.27 і 0.39. При розрахунках за методом водних балансів спостерігалися наступні максимальні значення  $K=0.45$  і  $\bar{S}/\sigma=0.82$  та наступні мінімальні –  $K=0.16$  і  $\bar{S}/\sigma=0.19$ . При розрахунках за моделлю кінематичної хвилі спостерігалися наступні максимальні

значення  $K=0.41$  і  $\bar{S}/\sigma=0.64$  та наступні мінімальні –  $K=0.14$  і  $\bar{S}/\sigma=0.20$ . Оскільки одержані кількісні показники якості розрахунків не виходять за допустимі межі, на підставі виконаної оцінки можна вважати, що обидва методи можуть бути використані для розрахунків гідрографів дощових паводків.

### Список літератури

1. Кучмент Л.С., Гельфан А.Н. Динамико-стохастические модели формирования речного стока. – М.: Наука, 1993. – 104 с.
2. Иваненко А.Г. Расчет дождевых паводков на основе учета полей факторов дождевого стока // Водные ресурсы. – 1986. – №4. – С. 38-46.
3. Бефани А.Н. Основы теории ливневого стока // Труды ОГМИ. – 1958. – Вып. XIV, Ч.2. – 311 с.
4. Захарова М.В. Застосування кінематичної моделі для розрахунку руслового стоку води // Метеорологія, кліматологія та гідрологія. – 2005. – Вип.49. – С. 469-477.

#### **Оценка точности расчетов гидрографов паводочного стока на основе метода водных балансов и модели кинематической волны. Захарова М.В.**

*В статье приведено краткое описание методов расчета гидрографов паводочного стока и проводится оценка результатов расчетов по модели кинематической волны и методу водных балансов.*

**Ключевые слова:** гидрограф, паводочный сток, кинематическая волна, водный баланс.

#### **Estimation of exactness of calculations of floods flow hydrographs by the method of water balances and model of kinematics wave. Zakharova M.**

*The brief description of methods of calculation of flood flow hydrographs is described in the article and the estimation of results of calculations by the model of kinematics wave and method of water balances is conducted.*

**Keywords:** hydrograph, flood flow, kinematics wave, water balance.