

Н.В. Приймаченко

## **ЗНАЧУЩІСТЬ ПРОЦЕСІВ ФОРМУВАННЯ ДОЩОВОГО СТОКУ НА ГІРСЬКИХ ВОДОЗБОРАХ**

Зроблено висновок про необхідність точності оцінки параметрів моделі і звернуто увагу на більш детальне дослідження тих процесів стоку, які є визначальними при різних гідрометеорологічних ситуаціях, що складаються на водозборі. Робота виконана на підставі застосування математичної моделі формування дощового стоку Дощ-3 на гірських водозборах Карпат. Оцінки отримані шляхом чисельних експериментів на основі даних фактичних спостережень. Досліджена чутливість математичної моделі формування дощового стоку Дощ-3 на мінливість її параметрів.

### **Проблемне питання**

Застосування математичного моделювання в практичній гідрології висуває ряд проблем. Однією з них, як відомо, є оцінювання параметрів моделей. При цьому важливо не тільки досягнення кінцевого результату, тобто одержання розрахованих гідрографів, близьких до спостережених, але й встановлення достовірних, фізично обґрунтованих значень параметрів. Через відсутність ряду важливих даних про будову водозбору при моделюванні перебігу стоку водозбір доводиться розглядати як систему, окремі властивості якої відомі лише приблизно. Ця обставина, а також неточність просторових значень вхідної гідрометеорологічної інформації змушують дослідника застосовувати для ідентифікації параметрів моделі стоку оптимізаційні процедури, що може привести до одержання неоднозначних рішень.

Важливо при цьому мати уявлення про відносну значущість окремих процесів у формуванні стоку води і тим самим приділяти увагу точності оцінювання відповідних модельних параметрів. Таке питання розглянуто на прикладі математичної моделі формування дощового стоку, яка застосовується в басейнових прогностичних системах Карпатського регіону (ДОЩ-3) [1-3] шляхом чисельних експериментів на базі даних фактичних спостережень.

### **Особливості структури математичної моделі**

У структурі моделі Дощ-3 враховані особливості формування стоку, притаманні гірській місцевості, а опис процесів, які відбуваються на водозборі та в річковій мережі, схематизовано таким чином, щоб при її застосуванні достатньою була наявність інформації зі стандартної мережі спостережень.

Вихідні засади та принципи побудови моделі враховують особливості гірських водозборів, для яких характерні умови, що сприяють утворенню підповерхневого стоку. У зв'язку з вищезазначеним річковий водозбір (чи його часткова площа) подається в моделі ДОЩ-3 як динамічна система, яка складається із трьох умовних ємностей, де відбувається утворення генетично різнорідних видів стоку води – поверхневого, підповерхневого та підґрунтового. Паводкові хвилі формуються тут переважно внаслідок взаємодії двох видів стоку води (поверхневого та підповерхневого), які з різними швидкостями переміщуються по поверхні водозбору та в товщі ґрунтового матеріалу. Стік води із підґрунтя на гірських річках порівняно незначний [1].

Якщо виникає потреба враховувати просторову нерівномірність водоутворення або відмінності в умовах переміщення паводкових хвиль по річковій мережі, водозбір ділиться на часткові площі й до кожної з них, тобто до кожного просторового об'єкта, застосовується оптимальний варіант моделі [3, 4].

Вхідними функціями моделі слугують середні по водозбору (частковій площі) значення інтенсивності опадів, дефіциту вологості повітря та швидкості приземного вітру.

У моделі Дощ-3 описані дві групи процесів, які зумовлюють водоутворення на поверхні водозбору та переміщення водних мас у річковій мережі. До елементарних процесів, що відбуваються на водозборі, відносяться наступні: випаровування, поверхневе затримання, просочування води в ґрунт, накопичення її в ґрунті та підґрунті, утворення різних видів стоку (рис. 1).

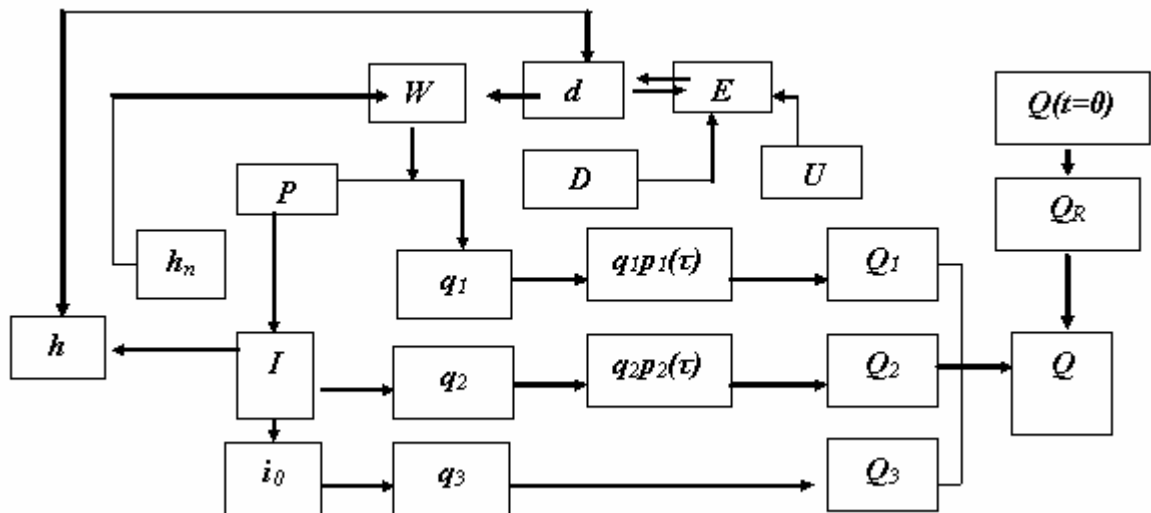


Рис. 1. Структура паралельної підсистеми математичної моделі ДОЩ-3

$P$  – інтенсивність опадів, мм;  $D$  – дефіцит вологості повітря, гПа;  $U$  – швидкість вітру, м/с;  $W$  – загальне зволоження водозбору, мм;  $d$  – дефіцит вологості ґрунту, мм;  $E$  – інтенсивність випаровування, мм;  $h_n$  – інтенсивність поверхневого затримання води, мм;  $h$  – інтенсивність затримання води в ґрунті, мм;  $I$  – інтенсивність інфільтрації, мм;  $i_0$  – інтенсивність фільтрації води, мм;  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_3$  – інтенсивність поверхневого, підповерхневого і ґрунтового водоутворення, мм;  $p_1(\tau)$ ,  $p_2(\tau)$  – функції впливу поверхневого і підповерхневого стоку;  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$  – витрати поверхневого, підповерхневого та ґрунтового стоку, м<sup>3</sup>/с;  $Q_R$  – витрата води внаслідок виснаження запасів води, що знаходилися в річковій мережі на початок періоду розрахунку, м<sup>3</sup>/с;  $Q$  – витрата води із часткової площі водозбору, м<sup>3</sup>/с.

Для опису процесів на водозборі в моделі діють 10 констант і параметрів [2]:

- $K_1, K_2$  – коефіцієнти рівняння для обчислення інтенсивності випаровування з поверхні водозбору;
- $K_3$  – параметр, який визначає здатність підповерхневого шару ґрунту і підґрунтя до вбирання (інфільтрації) та дренажування води;
- $K_4$  – параметр, який відображає зміну зволоженості водозбору внаслідок відтоку води;
- $K_5$  – коефіцієнт, який відбиває вплив зволоження поверхні водозбору за попередній проміжок часу на величину підповерхневого стоку;
- $W_m$  – максимальна вологоємність діючого шару ґрунту та підґрунтя, в якому формується підповерхневий стік;

Параметри  $K_3, K_5, W_m$  залежать від водно-фізичних властивостей ґрунту та підґрунтя (водовбирання, вологоємності, водовіддавання).

- $i_0$  – інтенсивність фільтрації води за межі ґрунту та підґрунтя (поповнення підґрунтового стоку);
- $m$  – параметр, який визначає інтенсивність зміни зволоженості водозбору та зміну відносного показника діючої площі водозбору  $\eta$ , де формується поверхневий стік у залежності від шару води, який утворився на ній;
- $R$  – параметр, що визначає інтенсивність виснаження підповерхневого та підґрунтового стоків.

Отже, перебіг стоку води в замикальному створі водозбору  $Q(t)$  визначається чотирма складовими – поверхневим  $Q_1(t)$ , підповерхневим  $Q_2(t)$ , підґрунтовим  $Q_3(t)$  водоутвореннями та виснаженням  $Q_R(t)$  запасів води, які накопичилися в річковій мережі до початку розрахункового періоду (за  $t = 0$ ):

$$R(t) = Q_1(t) + Q_2(t) + Q_3(t) + Q_R(t). \quad (1)$$

Питома вага цих складових залежить від інтенсивності опадів під час дощових паводків, змінюючись у значних межах. Це особливо помітно при порівнянні об'ємів поверхневого та підповерхневого стоку (табл. 1).

Таблиця 1

Частка видів стоку за дощових паводків різної висоти

| Види стоку     | Питома вага стоку (%)                |                     |                    |
|----------------|--------------------------------------|---------------------|--------------------|
|                | при паводках відповідної ймовірності |                     |                    |
|                | Високі<br>2 - 5%                     | Середні<br>20 - 30% | Низькі<br>40 - 60% |
| Поверхневий    | 60                                   | 24                  | 6                  |
| Підповерхневий | 38                                   | 75                  | 84                 |
| Підґрунтовий   | 2                                    | 1                   | 10                 |

### **Вплив похибок задання параметрів моделі на точність розрахунку гідрографа**

Сутність дослідження чутливості моделі у відношенні мінливості параметрів полягала в наступному. Спочатку за даними кількох паводків різної висоти встановлювалися оптимальні параметри. Потім

виконувалися розрахунки гідрографів для змінених значень параметрів, що задаються в діапазоні  $\pm 80\%$ ,  $\pm 50\%$ ,  $\pm 20\%$  початкової величини, отриманої при оптимізації моделі. У такий спосіб по кожному паводку розраховано 60 гідрографів.

Оцінка точності розрахунку гідрографів подана у вигляді відносних середніх абсолютних відхилень їх ординат  $\bar{\varepsilon}_Q$  (%), нормованих за середнім значенням ординат  $\bar{Q}$ , тобто:

$$\bar{\varepsilon}_Q = \frac{|\Delta Q|}{\bar{Q}} 100, \quad (2)$$

$$|\Delta Q| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Q_i - \tilde{Q}_i|,$$

$$\bar{Q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i,$$

де  $Q_i$ ,  $\tilde{Q}_i$  - ординати гідрографів при оптимальному і зміненому значенні параметра,  $n$  - число ординат гідрографа.

Відхилення значень параметрів  $\Delta p^{(m)}$ , що задаються, від оптимальних, виражені у відсотках останніх  $p^m$ :

$$\varepsilon_p = \frac{\Delta p^{(m)}}{p^{(m)}} 100. \quad (3)$$

Моделльні завдання вирішувалися із залученням паводків різної висоти на річках басейну Дністра з площами водозборів 106–204 км<sup>2</sup> – Головчанка, Орава, Опір, Рибник. Залежно від висоти паводка питома вага поверхневого стоку змінювалася від 60 до 6%, а підповерхневого – від 38 до 84% (див. табл. 1). Середні за паводок коефіцієнти стоку з названих водозборів (0,35–0,75) знаходилися в прямій залежності від інтенсивності дощу в його піковій частині. В окремі дощові періоди значення коефіцієнтів стоку протягом 3–6 годин можуть досягати 0,70–0,90 (червень 1969 р.). Найбільша інтенсивність поверхневого водоутворення збігається в часі переважно з піком опадів, а максимум підповерхневого водоутворення настає дещо пізніше – через 2–4 години.

У подальшому розглядаються результати чисельних експериментів за паводками на р. Орава біля Святослава (табл. 2, рис. 2). Наводити результати рішень по інших річках немає необхідності, оскільки вони

мають аналогічні показники стосовно модельних параметрів і похибок їх обчислень.

Таблиця 2

Відносні значення середніх абсолютних похибок  $\varepsilon_Q$  (%) обчислення гідрографів

| Параметри моделі | Відносні похибки $\varepsilon_Q$ за значення $\varepsilon_{pr}$ |             |             |
|------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------|-------------|
|                  | +20, 20                                                         | +50, 50     | +80, 80     |
| $K_1, K_2$       | 0,1 – 0,5                                                       | 0,3 – 2,7   | 0,7 – 3,3   |
| $K_3$            | 1,1 – 1,3                                                       | 6,6 – 12,5  | 15,0 – 23,8 |
| $W_m$            | 2,1 – 3,7                                                       | 4,5 – 6,5   | 11,9 – 13,6 |
| $i_0$            | 0,3 – 0,7                                                       | 1,5 – 2,5   | 2,5 – 3,8   |
| $\eta$           | 4,0 – 6,0                                                       | 13,0 – 17,0 | 20,0 – 30,9 |

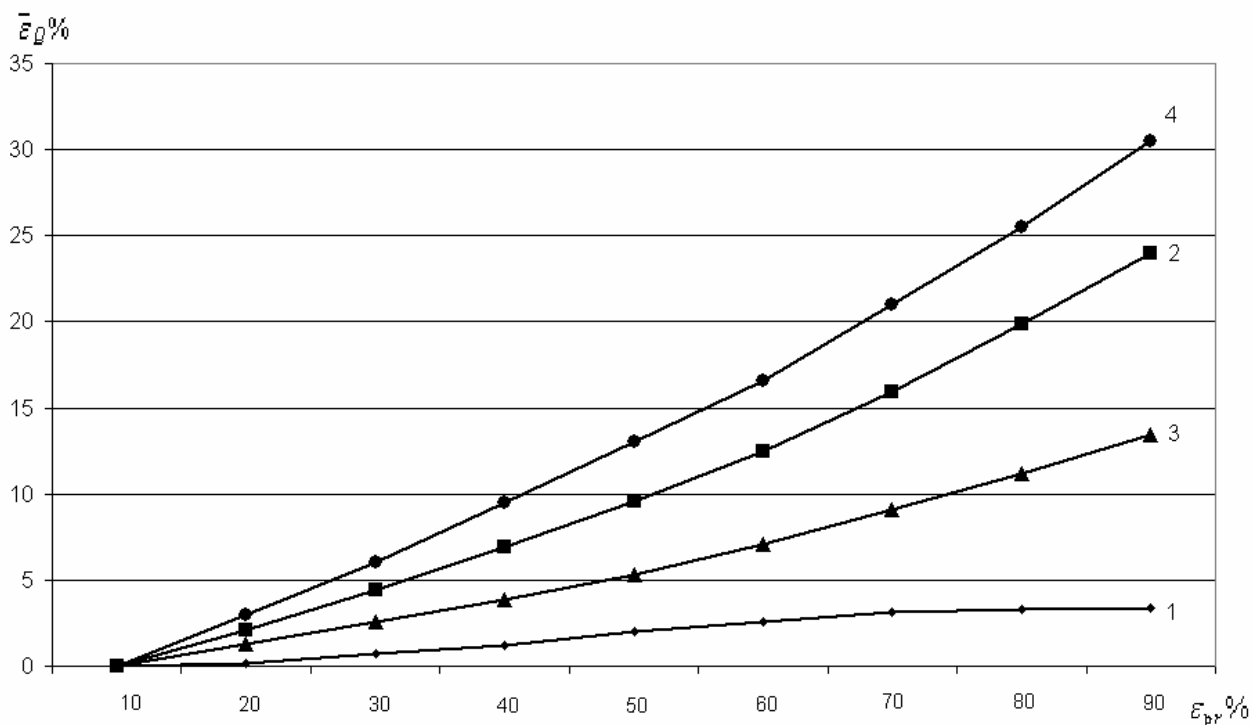


Рис. 2. Максимальні відносні значення середніх абсолютних похибок  $\bar{\varepsilon}_Q$  (%) обчислення гідрографів за різних значень  $\varepsilon_{pr}$  %: 1 –  $K_1, K_2$ , 2 –  $K_3$ , 3 –  $W_m$ , 4 –  $\eta$

У табл. 2 і на рис. 2 розглянуто вплив лише тих модельних параметрів, які визначають процеси водоутворення та втрати дощової води. Зміни параметрів  $K_1$  і  $K_2$  впливають неістотно на точність розрахунку паводків, оскільки випаровування з поверхні водозбору під час паводків не перевищує 0,2–0,3 мм за добу. Ці параметри можуть

впливати більш вагомо в передпаводковий період при обчисленні зволоженості водозбору.

Параметри  $K_3$  і  $W_m$  входять до модельних рівнянь для обчислення дефіциту зволоженості водозбору, інтенсивності інфільтрації, підповерхневого водоутворення, затримання води в ґрунті. Відношенням цих параметрів ( $W_m / K_3$ ) визначається максимальна інтенсивність підповерхневого водоутворення. Значення  $W_m / K_3$  досягає на карпатських водозборах 4–5 мм/3 год.

Отже, похибки задання цих параметрів відчутно впливають на точність розрахунку стоку води. Якщо значення параметра  $K_3$  завищено в порівнянні з оптимальним, то при обчисленні зменшується інтенсивність інфільтрації та відповідно збільшується частка поверхневого стоку.

Параметр  $W_m$  характеризує максимально можливі запаси води в підповерхневому горизонті. За інтенсивних опадів при заниженні значення  $W_m$  відбувається перерозподіл водоутворення між поверхневим і підповерхневим стоком води. Завищення  $W_m$  призводить до збільшення об'єму води та поповнення запасів у підґрунті. Тому обчислений гідрограф спотворюється.

Вплив зміни коефіцієнта фільтрації  $i_0$  позначається на точності обчислення низьких паводків, коли підґрунтовий стік набуває більшої відносної ваги в загальному об'ємі паводку.

Вплив показника діючої площі водозбору  $\eta$  на точність обчислення гідрографа залежить від відносної частки поверхневого стоку в загальному об'ємі паводку. За низьких паводків цей вплив незначний. За середніх і високих паводків відносні похибки внаслідок зміни параметра  $\eta$  можуть досягати 20-32%.

## Висновки

Шляхом чисельних експериментів досліджена чутливість математичної моделі формування дощового стоку Дощ-3, яка застосовується в умовах гірської місцевості.

Вплив точності задання параметрів моделі на якість обчислення перебігу стоку води в значній мірі залежить від рівня поля опадів, що зумовлює співвідношення між поверхневим і підповерхневим стоком.

Отримані кількісні оцінки похибок обчислення гідрографів дощових паводків дають уявлення про значущість окремих параметрів моделі та процесів формування стоку води, які в ній описані.

\* \*

*Сделано выводы о необходимой точности оценки параметров модели и обращено внимание на более детальное исследование тех процессов стока, которые наиболее значимы при различных гидрометеорологических ситуациях, которые складываются на водосборе. Работа выполнена на основании использования математической модели формирования дождевого стока Дождь-3 на горных водосборах Карпат. Оценки получены путем численных экспериментов над фактическими данными наблюдений. Была исследована чувствительность математической модели формирования дождевого стока Дождь-3 на изменчивость ее параметров.*

\* \*

1. *Соседко М.Н.* Порядок оптимизации параметров математической модели формирования дождевого стока, применяемой в условиях горной местности // Труды УкрНИГМИ. - Вып. 183. – М.: Гидрометеиздат, 1980. – С. 15-21.
2. *Соседко М.Н.* Из опыта идентификации математической модели формирования дождевого стока на горных водосборах // Труды УкрНИГМИ. - Вып. 201. – М.: Гидрометеиздат, 1985. – С. 40-55.
3. *Сусідко М.М.* Математичне моделювання процесів формування стоку як основа прогностичних систем // Гідрологія, гідрохімія, гідроекологія. - Т. 1. – К.: Ніка-Центр, 2000. – С. 203-206.
4. *Luk'yanets O.I., Sosyedko M.M.*: Information and forecasting system in the Tisza river basin. 20<sup>nd</sup> Conference of the Danube Countries, Compact-disk, Bratislava, Slovakia. – 2000.

*Український науково-дослідний  
гідрометеорологічний інститут, Київ*