

УДК 556.166

Є.Д.Гопченко, д.геогр.н., В.А.Овчарук, к. геогр. н., М.Є.Романчук, к. геогр. н.,
А.В.Траскова, асп.

Одеський державний екологічний університет

НАУКОВО–МЕТОДИЧНА БАЗА ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТРИВАЛОСТІ СХИЛОВОГО ПРИПЛИВУ ПІД ЧАС ДОЦОВИХ ПАВОДКІВ І ВЕСНЯНИХ ВОДОПІЛЬ

У статті розглядаються науково-методичні підходи, пов'язані з обґрунтуванням тривалості припливу води зі схилів в періоди формування екстремально високих дощових паводків і весняних водопіль.

Ключові слова: дощові паводки, водопілля, максимальний стік, схиловий приплив.

Вступ. Тривалість схилового припливу води до руслової мережі в періоди формування дощових паводків і весняних водопіль є одним з провідних параметрів у розрахункових формулах максимального стоку і входить до їх структури у явному або прихованому вигляді. Але, на жаль, в системі спостережень за гідрологічним режимом річок Гідрометслужби фактично в усіх країнах світу не організовано вимірювань складових схилового стоку, за винятком експериментальних досліджень на водно – балансових станціях. Матеріали водно – балансових станцій самі по собі мають велику теоретичну цінність, головним чином, з точки зору вивчення процесів формування стоку. Щодо практичного їх використання, то вони дуже обмежені регіональними особливостями стокоутворення.

Організація ж густої системи водно – балансових станцій, очевидно, не можлива через економічну недоцільність їх утримання. З іншого боку, склалася тупикова ситуація для подальшого розвитку методів розрахунку і прогнозу характеристик гідрологічного режиму річок.

Сучасний стан в області гідрологічних розрахунків. Розрахункові методики характеристик стоку дощових паводків і весняних водопіль у теоретичному відношенні ґрунтуються на геометричних моделях гідрографів стоку або з використанням ізохрон руслового добігання [1]. При схематизації гідрографів схилового і руслового стоку у вигляді одноmodalьних нелінійних трикутників базове рівняння має вигляд

$$q_m = \frac{q'_m}{1 + \frac{\delta}{T_0}} k_m k_n, \quad (1)$$

де q_m – максимальний модуль стоку;

q'_m – максимальний модуль схилового припливу;

t_p - тривалість руслового добігання;

T_0 - тривалість схилового припливу;

$$k_m = \frac{\frac{m_1 + 1}{m_1}}{\frac{n + 1}{n}} - \text{коефіцієнт трансформації форми гідрографів};$$

$k_n = \frac{T_0 + t_p}{T_n}$ - коефіцієнт русло- заплавного регулювання паводків (водопіль) ;

T_n - тривалість паводків (водопіль).

Коефіцієнти $\frac{I}{1 + \frac{t_p}{T_0}}, k_m, k_n$ мають редуційну природу в залежності від

розміру водозборів, причому їх спільну дію можна описати за допомогою рівняння

$$\frac{1}{1 + \frac{t_p}{T_0}} k_m k_n = f(F) = \frac{1}{(F + 1)^{n_1}} . \quad (2)$$

З урахуванням рівняння (2)

$$q_m = \frac{I}{(F + 1)^{n_1}} . \quad (3)$$

Тобто спрощений варіант (1) фактично зводиться до відомої структури емпіричної формули максимального стоку Д.І. Кочеріна – Д.Л. Соколовського [2]. Параметри q'_m і n_1 визначались графічним шляхом за залежностями $\lg q_m = f \lg(F + 1)$.

Д.Л. Соколовський [2] шляхом спрощеного моделювання паводків і водопіль у вигляді лінійних трикутників довів, що:

$$\frac{1}{1 + \frac{t_p}{T_0}} = \frac{1}{(F + 1)^{n_1}} . \quad (4)$$

І тим самим не бере до уваги наявності таких складових загальної редуції як k_m і k_n . Крім того з'ясувалося, що у редакції (3) формула не відповідає необхідній точності, яка передбачається відповідними нормативними документами. Дослідженнями К.П. Воскресенського [3] доведено, що q'_m значною мірою залежить від шару стоку Y_m , а саме:

$$q'_m = k_0 Y_m , \quad (5)$$

де k_0 - коефіцієнт дружності весняного водопілля.

При підстановці (5) в (3) одержимо варіант емпіричної формули Д.Л. Соколовського – К.П. Воскресенського [2] :

$$q_m = \frac{k_0 Y_m}{(F + 1)^{n_1}} . \quad (6)$$

У такому вигляді формула (6) була використана при підготовці нормативних документів СН 435-72, СНіП 2.01.14-83, СП 33-101-2003. Шар стоку визначався за допомогою карт, а k_0 рекомендувалось встановлювати із залученням методу гідрологічної аналогії або районування по природних зонах і типах підстильної поверхні.

На основі аналізу редуційних гідрографів схилового стоку в [4] пропонується рівняння

$$q'_t = q'_m \left[1 - \left(\frac{t}{t_\delta} \right)^m \right]. \quad (7)$$

Інтегрування (7) по T_0 дозволяє визначити шар стоку

$$Y_m = \int_0^{T_0} q'_t dt = \frac{n}{n+1} T_0 q'_m, \quad (8)$$

звідки

$$q'_m = \frac{n+1}{n} \frac{1}{T_0} Y_m, \quad (9)$$

де $\frac{n+1}{n}$ - коефіцієнт часової нерівномірності схилового припливу.

Повертаючись до (5) і (9), можна дійти висновку, що

$$k_0 = \frac{n+1}{n} \frac{1}{T_0}. \quad (10)$$

За своєю природою k_0 характеризує трансформацію гідрографів схилового припливу за рахунок тривалості T_0 .

Таким чином, і базовий варіант (1), і спрощені структури геометричних моделей гідрографів стоку включають в себе тривалість схилового припливу T_0 .

Серед формул, оснований на теорії руслових ізохроні, найбільш відомою і такою, що набула досить широкого практичного застосування є розрахункова схема А.М. Бефані [5]:

$$q_m = \frac{Y_m}{t_p} \varphi \cdot k_2 \varepsilon_F, \quad (11)$$

де Y_m - шар стоку за паводок (водопілля);

t_p - тривалість руслового добігання;

φ - коефіцієнт діючого шару припливу води зі схилів до руслової мережі:

- при $(t_p/T_0) < 1.0$

$$\varphi = \frac{n+1}{n} \frac{t_\delta}{T_0} \left[1 - \frac{1}{n+1} \left(\frac{t_\delta}{T_0} \right)^n \right], \quad (12)$$

- при $(t_p/T_0) \geq 1.0$

$$\varphi = 1.0, \quad (13)$$

k_2 - гідрографічний коефіцієнт:

- при $(t_p/T_0) = 0$

$$k_2 = 1.0 \quad (14)$$

- при $0 < (t_p/T_0) < 1.0$

$$k_{\tilde{a}} = k_1 = \frac{1 - \frac{(m+1)}{(n+1)(m+n+1)} \left(\frac{t}{T_0}\right)^n}{1 - \frac{1}{n+1} \left(\frac{t}{T_0}\right)^n}; \quad (15)$$

- при $(t_p/T_0) \geq 1.0$

$$k_2 = k_2 = \frac{m+1}{m} - \frac{(n+1)}{m(m+n+1)} \left(\frac{T_0}{t_p}\right)^m. \quad (16)$$

- при $t_p \gg T_0$

$$k_2 = \frac{m+1}{m}; \quad (17)$$

ε_F - коефіцієнт русло – заплавного зарегулювання паводків (водопіль).

З (12)-(16) видно, що складові φ і k_2 значною мірою залежать від тривалості схилового припливу T_0 .

Сучасний варіант формули, побудованої на теорії руслових ізохрон, концептуально узгоджується з (11), але має дещо іншу редакцію [1]

$$q_m = q'_m \psi\left(\frac{t_p}{T_0}\right) \varepsilon_F, \quad (18)$$

де $\psi\left(\frac{t_p}{T_0}\right)$ - трансформаційна функція розпластування під впливом руслового добігання:

- при $(t_p/T_0) = 0$

$$\psi\left(\frac{t_p}{T_0}\right) = 1.0; \quad (19)$$

- при $0 < (t_p/T_0) < 1.0$

$$\psi\left(\frac{t_p}{T_0}\right) = 1 - \frac{m+1}{(n+1)(m+n+1)} \left(\frac{t_p}{T_0}\right)^n; \quad (20)$$

- при $(t_p/T_0) \geq 1.0$

$$\psi\left(\frac{t_p}{T_0}\right) = \frac{n}{n+1} \frac{T_0}{t_p} \left[\frac{m+1}{m} - \frac{n+1}{m(m+n+1)} \left(\frac{T_0}{t_p}\right)^m \right]; \quad (21)$$

- при $(t_p/T_0) \gg 1.0$

$$\psi\left(\frac{t_p}{T_0}\right) = 0. \quad (22)$$

Як і у попередньому варіанті, трансформаційні коефіцієнти в усіх рівняннях визначаються у тому числі й тривалістю схилового припливу T_0 . Це ж стосується і максимального модуля припливу q'_m , який описується рівнянням (9) з параметром T_0 .

Науково – методичні підходи до визначення тривалості силового припливу. Найбільш простими є варіанти, які можуть реалізовуватись в структурах геометричних моделей. З цією метою повернемося до рівняння (1). Якщо в нього замість q'_m підставимо його значення з (9), то

$$q_m = \frac{n+1}{n} \frac{1}{T_0} \frac{Y_m}{1 + \frac{t_p}{T_0}} k_m k_n. \quad (23)$$

Перепишемо (23) відносно шуканого значення T_0 , тобто

$$T_0 = \frac{n+1}{n} \frac{Y_m}{q_m} k_m k_n - t_p. \quad (24)$$

До рівняння (23) входить два невимірюваних параметри – тривалість схилового припливу T_0 і коефіцієнт русло – заплавного зарегулювання k_n . Розв'язання його можна здійснити в 2 етапи. На першому накладаються обмеження на k_n , беручи його рівним одиниці (верхнє межове значення при $F=0$). Розраховані за (24) величини будуть, очевидно, завищеними, оскільки $k_n \leq 1.0$. Враховуючи, що коефіцієнт русло – заплавного зарегулювання k_n залежить від площі водозборів, доцільно й до T_0 застосувати побудування графіка $T_0 = f(\lg(F+1))$. На ньому проводиться лінія тренда у вигляді функції

$$T_0 = T_0' e^{-a \lg(F+1)}, \quad (25)$$

де T_0' - осереднена для регіону тривалість припливу за умови, що $F=0$.

Після цього за рівнянням (24) розраховуються оберненим шляхом k_n

$$k_n = (t_p + T_0') / \frac{n+1}{n} \frac{Y_m}{q_m} k_m. \quad (26)$$

Узагальнення коефіцієнтів русло – заплавного зарегулювання k_n виконується шляхом побудови залежності $k_n = f(\lg(F+1))$, яка описується рівнянням

$$k_n = e^{-b \lg(F+1)}. \quad (27)$$

На другому етапі, використовуючи (24) і (26), встановлюються для усіх водозборів тривалості схилового припливу.

Просторове узагальнення тривалостей T_0 здійснюється з урахуванням географічного положення водозборів і факторів схилового (висотне положення, залісеність і заболоченість водозборів, наявність карсту) та руслового (наявність водойм проточного типу: озер, водосховищ, ставків) стоку.

В структурі найбільш спрощеного варіанта редуційної формули, основаної на геометричній моделі (3), за вихідними даними q_m будується у логарифмічних координатах емпірична залежність $lg q_m = f(lg(F + I))$. Тангенс кута нахилу лінії зв'язку є показником степеня n_1 . Тепер є можливість на основі (3) для кожного водозбору визначити q'_m .

$$q'_m = q_m (F + I)^{n_1}. \quad (28)$$

Застосовуючи до (9) визначені за (28) модулі схилового припливу q'_m , встановлюються індивідуальні значення T_0

$$T_0 = \frac{n + I}{n} \frac{Y_m}{q'_m}. \quad (29)$$

Обчислені за (29) тривалості припливу схилових вод T_0 у подальшому підлягають просторовому узагальненню.

Якщо ж розглядати редуційний варіант формули максимального стоку у вигляді (6), то спочатку перепишемо її таким чином

$$q_m / Y_m = \frac{k_0}{(F + I)^{n_1}}. \quad (30)$$

Після логарифмування (30) і побудування залежності $lg(q_m / Y_m) = f(lg(F + I))$ графічним шляхом визначається показник степеня n_1 . Індивідуальні значення k_0 розраховуються у структурі (6)

$$k_0 = \frac{q_m}{Y_m} (F + I)^{n_1}. \quad (31)$$

Тепер з використанням (10) для кожного водозбору встановлюються пошукові величини T_0

$$T_0 = \frac{n + I}{n} / k_0. \quad (32)$$

Після такої процедури усі значення T_0 підлягають просторовому узагальненню. З іншого боку, і це дуже важливо, при застосуванні, наприклад, формули (1) досить просто вирішується проблема обґрунтування коефіцієнтів русло – заплавного зарегулювання k_n , оскільки все обмежується простим алгебраїчним прийомом.

Просторове узагальнення k_n відбувається за схемою (27).

Більш складною виявляється обчислювальна процедура встановлення тривалості схилового припливу у структурі формул, оснований на теорії руслових ізохрон, зокрема, (11) і (18). Якщо в першу підставити замість φ і k_2 їх значення, виходячи з

(12)- (17), а в другу – замість $\psi \left(\frac{t_p}{T_0} \right)$ - (19)-(22), то відносно T_0 можна записати рівняння:

$$- \text{ при } \left(\frac{t_p}{T_0} \right) < 1.0$$

$$T_0 = \left(\frac{Y_m \varepsilon_F}{n q_m} \right)^{\frac{1}{n+1}} \left[(n+1) T_0^n - \frac{m+1}{n+m+1} t_p^n \right]^{\frac{1}{n+1}} ; \quad (33)$$

- при $\left(\frac{t_p}{T_0} \right) \geq 1.0$

$$T_0 = \left[\left(\frac{m+n+1}{n+1} - \frac{q_m}{Y_m \varepsilon_F} \right) \frac{m+n+1}{(n+1)} t_p^m \right]^{\frac{1}{m}} . \quad (34)$$

Визначення T_0 в структурах (33) і (34) ускладнюється тим, що в кожній з них, крім T_0 , невідомим залишається ще й коефіцієнт русло – заплавного зарегулювання ε_F . У свою чергу наявні рівняння не утворюють системи. Як і у випадку вирішення аналогічної задачі при використанні рівняння (1), потрібно кожне з рівнянь розглядати в два стани (з накладанням обмежень на параметр ε_{II}), беручи на першому етапі $\varepsilon_{II} = 1.0$, а надалі все відбувається за схемою (1). Слід також зауважити, що за таких умов на першому етапі алгебраїчним шляхом буде вирішуватись лише рівняння (34). Щодо рівняння (33), а саме з нього розпочинається процедура визначення T_0 , то воно трансцendentного типу і для свого вирішення потребує залучення обчислювальних методів. Досить ефективним, на наш погляд, може бути застосування методу простої однокрокової ітерації. Рівняння (33) має два дійсних корені, причому фізично задовольняє вирішення поставлених задач лише верхній з них. Ось чому пропонується нульове наближення T_0 завжди розпочинати з деякого числа, більшого за тривалість руслового добігання t_p . Точність, з якою відбувається ітерація, задається дослідником.

Послідовність обчислювальних процедур відбувається автоматично таким чином.

Задане явно більше, ніж t_p , початкове наближення використовується для здійснення пошуку кореня T_0 у рівнянні (33). На кожному кроці відбувається порівняння обчислень T_0 з тривалістю руслового добігання t_p . Якщо на якомусь кроці $t_p > T_0$, а задана точність не досягається, то пошук тривалості T_0 буде відбуватися у структурі рівняння (34), але вже алгебраїчним шляхом.

Після вирішення задачі встановлення T_0 на першому етапі подальшим є побудування залежності T_0 від розміру водозборів. За її допомогою визначається середня для регіону величина $T_0 = T_0'$, як відрізок на осі ординат залежності $T_0 = f \lg(F+1)$ при $F=0$.

Виходячи з (11) або (18), оберненим шляхом встановлюються відповідні коефіцієнти русло – заплавного зарегулювання ε_F . Їх узагальнення, також як і k_n , виконується графічним шляхом при використанні функції вигляду (27). Тепер, за наявністю залежності $\varepsilon_F = f(F)$, на другому етапі здійснюється остаточне розв'язання рівнянь (33) і (34) відносно T_0 . На кафедрі гідрології суші ОДЕКУ запропонована обчислювальна програма «Сагуар», за допомогою якої автоматизовано процедуру пошуку T_0 в структурі рівнянь (33) або (34).

Висновки:

1. Проблема визначення тривалості схилового припливу полягає в тому, що з одного боку, вона є найбільш важливим чинником формування паводків і водопіль, а з іншого, спостереження за характеристиками схилового стоку не проводяться.

2. Авторами запропоновано декілька методичних підходів для встановлення тривалості схилового припливу в структурі формул, запропонованих на схематизації гідрографів стоку і теорії руслових ізохрон.

3. Для практичного застосування можна рекомендувати комплексний варіант, який полягає у наступному:

3.1 За вихідними даними модулів максимального стоку будується їх залежність (у логарифмічних координатах) від розміру водозборів.

3.2 Потім оберненим шляхом обчислюються для усіх постів максимальні модулі схилового стоку q'_m , як $q_m(F+1)^{n_1}$. За допомогою (9) тепер визначаються пошукові значення тривалості припливу T_0 .

3.3 За такою методологією тепер доцільно скористатись рівняннями (33) і (34), щоб однозначно вирішити задачу відносно коефіцієнтів русло – заплавного зарегулювання паводків і водопіль \mathcal{E}_F .

Список літератури

1. Гопченко Е.Д., Романчук М.Е. Нормирование характеристик максимального стоку весеннего половодья на реках Причерноморской низменности. Киев, КНТ, 2005. - 148 с.
2. Соколовский Д.Л. Речной сток. – Л. : Гидрометеиздат, 1959. – 547 с.
3. Воскресенский К.П. Гидрологические расчеты при проектировании сооружений на малых реках, ручьях и временных водотоках. – Л. : Гидрометеиздат, 1956. – 467 с.
4. Гопченко Е.Д. Некоторые проблемные вопросы расчета максимального паводочного стока // Докл. АН СССР. – 1988. - т.302, №4. - С. 955-957.
5. Бефани А.Н., Бефани Н.Ф., Гопченко Е.Д. Региональные модели формирования стока на территории СССР. - Обнинск, 1981. - Вып. 2. - 60 с.

Научно – методическая база для определения продолжительности склонового притока во время дождевых паводков и весенних половодий

Гопченко Е.Д., Овчарук В.А., Романчук М.Є., Траскова А.В.

В статье рассматриваются научно-методические подходы, связанные с обоснованием продолжительности притока воды со склонов в периоды формирования экстремально высоких дождевых паводков и весенних половодий.

Ключевые слова: дождевые паводки, половодье, максимальный сток, склоновый приток.

Scientific - methodological basis for the determining of the duration the slope influx during rain floods and spring floods.

Gopchenko E.D., Ovcharuk V.A., Romanchuk M.E., Traskova A.V.

The article considers scientific-methodical approaches associated with substantiation duration of influx from the slopes during the formation of extremely high rain floods and spring floods.

Keywords: rain floods, spring flood, maximum runoff, slope influx.