

ДО ПРОЕКТУВАННЯ ГІДРОГРАФІВ ПАВОДКІВ І ВОДОПІЛЬ РІВНИННИХ РІЧОК УКРАЇНИ

У статті наводяться науково-методичні обґрунтування побудови розрахункових гідрографів стоку.

Ключові слова: проектування гідрографів стоку, об'ємні формули, коефіцієнти перевищення добових максимальних витрат води.

Вступ. Розрахунки гідрографів весняного водопілля і дощових паводків мають важливе значення при утворенні водосховищ, а також у зв'язку з необхідністю пропуску високих вод через дорожні та інші штучні гідротехнічні споруди.

За даними [1] рівнинні річки характеризуються частіше за все одномодальним весняним водопіллям. Ще у більшій мірі це відноситься до паводків дощового походження, які у степовій зоні України майже виключно формуються за рахунок окремих коротких, але інтенсивних злив. Завдяки цьому значно спрощується завдання щодо моделювання гідрографів дощових паводків і весняних водопіль, наприклад, у вигляді нелінійних трикутників з відповідними об'ємами, максимальними витратами води і тривалістю стоку. Саме такі рекомендації містяться у нормативному документі СНіП 2.01.14-83 [2], яким передбачено схематизацію гідрографів паводків і водопіль приймати за геометричними формами, причому розрахунковій ймовірності перевищення повинні відповідати як максимальні витрати води, так і шари (або об'єми) стоку. Має місце ще одне визначення: гідрографи весняного водопілля надаються по середніх добових величинах витрат води, а дощових паводків – по миттєвих їх значеннях.

Сучасний стан у вирішенні проблеми. В залежності від наявності вихідної інформації з максимального стоку розрізняють й науково-методичні підходи стосовно проектування гідрографів. Якщо по об'єкту є достатній ряд спостережень за стоком, то як найбільш поширений прийом проектування розрахункового гідрографа використовується метод гідрологічної аналогії. За модель – гідрограф береться реальний паводок чи водопілля з найбільшою максимальною витратою води за період спостережень. Перехід до координат розрахункового гідрографа здійснюється за схемою [1]

$$Q_i = Q_{i,m} k_Q \quad (1)$$

i

$$t_i = t_{i,m} k_t, \quad (2)$$

де $Q_{i,m}$ та Q_i - відповідні для гідрографа моделі та його розрахункового варіанта витрати води в i-у одиницю часу;

$t_{i,m}$ і t_i - відповідні $Q_{i,m}$ і Q_i часові величини абсцис;

k_Q - перехідні коефіцієнти до розрахункових ординат гідрографів;

k_t - перехідні коефіцієнти до розрахункових абсцис гідрографів,

причому

$$k_t = (q_m / Y_m) \cdot (Y_p / q_p), \quad (3)$$

q_m і Y_m та q_p і Y_p - максимальний модуль і шар стоку модельного та розрахункового гідрографів.

За коротких рядів спостережень як модельний може використовуватись так званий типовий гідрограф, ординати і абсциси якого встановлюються шляхом осереднення декількох високих гідрографів паводків чи водопіль. Надаються вони у відносних величинах.

За відсутності спостережень є декілька практичних рекомендацій [1, 2]:

1. За Д.Л.Соколовським гідрографи описуються рівняннями
- у фазі підйому

$$Q_t = Q_m \left(\frac{t}{t_n} \right)^{m_1}; \quad (4)$$

- у фазі спаду

$$Q_t = Q_m \left(\frac{t_{cn} - t}{t_{cn}} \right)^{m_2}, \quad (5)$$

де t_n – тривалість підйому;

t_{cn} – тривалість спаду;

Q_m – максимальна витрата води.

Для визначення m_1 і m_2 виконаємо інтегрування (4) і (5), відповідно по t_n і t_{cn} .

Тоді:

- у фазі підйому

$$W_n = \int_0^{t_n} Q_t dt = \frac{1}{m_1 + 1} Q_m t_n; \quad (6)$$

- у фазі спаду

$$W_{cn} = \int_0^{t_{cn}} Q_t dt = \frac{1}{m_2 + 1} Q_m t_{cn}, \quad (7)$$

де W_n – об'єм стоку у фазі підйому;

W_{cn} – об'єм стоку у фазі спаду.

З (6) і (7)

$$m_1 + 1 = \frac{Q_m t_n}{W_n} = \frac{Q_m t_n}{Y_m \cdot F}, \quad (8)$$

а

$$m_2 + 1 = \frac{Q_m t_{cn}}{W_{cn}} = \frac{Q_m (T_n - t_{cn})}{Y_m \cdot F}, \quad (9)$$

де T_n – тривалість водопілля або паводка, причому $T_n = t_n + t_{cn}$.

2. За Г.О.Алексєєвим [2] гідрографи розраховуються на основі рівняння

$$y = 10^{-a(1-x)^2/x}, \quad (10)$$

де $y = Q_i / Q_m$ - ординати гідрографа;

$x = t_i / t_n$ - абсциси гідрографа.

Тривалість підйому водопілля або паводка t_n визначається за рівнянням [2]

$$t_n = \lambda y_p / q_p, \quad (11)$$

де y_p – розрахунковий шар стоку забезпеченістю $P\%$;

q_p – максимальний середньодобовий модуль стоку забезпеченістю $P\%$.

Параметр λ , який визначається формою гідрографів, встановлюється за допомогою спеціально розробленої таблиці, з використанням коефіцієнта несиметричності гідрографів k_s . Останній фактично є співвідношенням

$$k_s = Y_n / Y_m, \quad (12)$$

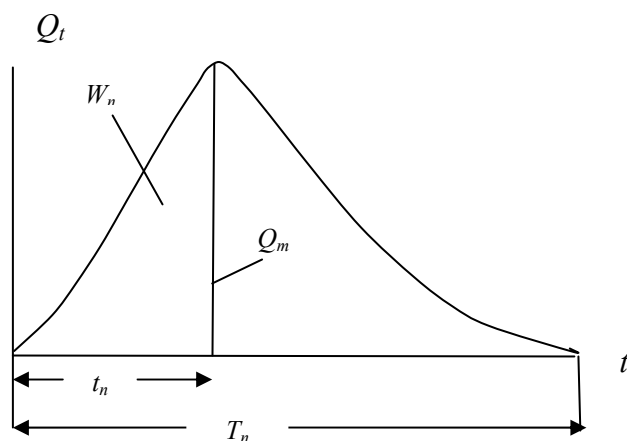
де Y_m – шар стоку за період водопілля чи паводка.

Ординати гідрографів (у нормованому вигляді, тобто Q_i/Q_m) представлені таблицею [1] в залежності від k_s і співвідношення t_i/t_n (у діапазоні від 0 до 8.0). Найменша кількість ординат Q_i/Q_m розрахункових гідрографів може становити 12 (при $k_s=0.44$), а найбільша – 30 (при $k_s=0.3-0.4$).

За наявності рядів спостережень використання (10) для одномодальних гідрографів особливих труднощів не створює. За їх же відсутності завжди виникають проблеми встановлення k_s . Нормативним документом СНіП 2.01.14-83 передбачається k_s призначати по річках-аналогах. Але це досить не визначена рекомендація і тому можуть мати місце прорахунки суто суб'єктивного характеру.

3. Можливий ще один варіант побудови гідрографів стоку. Він полягає у здійсненні індивідуального проектування водопілля по ходу кривих водовіддачі і розподілу одиничних площадок водозборів. Особливої уваги він заслуговує при розробці прогнозних методик весняного водопілля. При цьому необхідно пам'ятати, що прогнозування сніготанення і водовіддачі вважається не менш складним завданням, аніж побудування самих гідрографів. Крім того, використання руслових ізохрон потребує також урахування ефектів русло-заплавного регулювання. Свого часу, враховуючи складність прогнозування часових графіків сніготанення, А.В.Огієвський [3] як вихідне надходження води зі схилів до руслової мережі використав гідрографи стоку невеликих річок.

Обґрунтування методики, що рекомендується для проектування гідрографів стоку. Перш за все, ми виходимо з того, що на рівнинних річках степової зони України високі весняні водопілля мають у своїй більшості одномодальні гідрографи, навіть не зважаючи на опади, які спостерігаються у період їх формування. У такому випадку можна використати рівняння гідрографа (10). Удосконаленню підлягають лише визначення параметрів k_s і λ , а також розрахунки такої базової характеристики, як максимальна витрата води Q_m . Схематично гідрограф весняного водопілля представлено на рис. 1.



Якщо помістити початок координат у кінці підйому, то

$$Q_t = Q_m \left[1 - \left(\frac{t}{t_n} \right)^{n_1} \right]. \quad (13)$$

Увесь гідрограф будемо розглядати у редуційному вигляді, а саме

$$Q_t = Q_m \left[1 - \left(\frac{t}{T_n} \right)^m \right]. \quad (14)$$

Рисунок 1 - Одномодальний гідрограф весняного водопілля.

Інтегрування (13) по t_n дає змогу отримати W_n , тобто

$$W_n = \int_0^{t_n} Q_t dt = \frac{n_1}{n_1 + 1} Q_m t_n. \quad (15)$$

З іншого боку, інтеграл від (14) по T_n представляє собою загальний об'єм водопілля W_m , тобто

$$W_m = \int_0^{T_n} Q_t dt = \frac{m}{m + 1} Q_m T_n. \quad (16)$$

Підставимо (15) і (16) у (12), тоді

$$k_s = W_n / W_m = \frac{m + 1}{m} \left/ \frac{n_1 + 1}{n_1} \frac{t_n}{T_n} \right. . \quad (17)$$

Часові коефіцієнти нерівномірності стоку в період фази підйому $\frac{n_1 + 1}{n_1}$ і в цілому за водопілля $\frac{m + 1}{m}$ можуть бути розраховані по матеріалах спостережень на окремих гідрологічних постах. Виходячи з (15) і (16),

$$\frac{n_1 + 1}{n_1} = \frac{Q_m \cdot t_n}{W_n} 86.4, \quad (18)$$

а

$$\frac{m + 1}{m} = \frac{Q_m \cdot T_n}{W_m} 86.4, \quad (19)$$

де Q_m – максимальна витрата води, м³/с;

W_n і W_m – об'єми стоку за період підйому гідрографа стоку і за водопілля в цілому, м³;

t_n і T_n – тривалості підйому і водопілля в цілому, д.

З метою визначення k_s невивчених у гідрологічному відношенні річок пропонується, як перший варіант, узагальнити відношення $\frac{m + 1}{m} \left/ \frac{n_1 + 1}{n_1} \right.$ і $\frac{t_n}{T_n}$ в залежності від розмірів водозборів. Таким чином, методична база стосовно встановлення k_s полягає у нормуванні його складових на основі матеріалів спостережень за стоком річок.

Окреме місце у розрахунковій схемі гідрографів весняного водопілля належить проблемі визначення максимальної витрати води Q_m . У гідрологічній практиці запропоновано велику кількість формул і методик для розрахунку Q_m . Усі вони передбачають встановлення миттєвого значення максимальної витрати води. У той же час, як вже згадувалось раніше, при проектуванні гідрографів весняного водопілля повинні використовуватись середньодобові максимуми.

У теоретичному відношенні найбільш обґрунтованими є формули об'ємного типу, а також ті, що засновані на теорії руслових ізохрон. Оскільки йдеться про проектування гідрографів одноmodalної форми, то доцільно використати й структуру, що базується на геометричній схематизації водопіль. Зокрема розглядаючи редуційний гідрограф водопілля у вигляді (14), нами після його інтегрування було отримане рівняння (16). Запишемо його відносно максимального модуля стоку q_m , тобто

$$q_m = \frac{m+1}{m} \frac{Y_m}{T_n}. \quad (20)$$

Щоб звести (20) до операторного вигляду, домножимо чисельник і знаменник на k_0 , яке співпадає з коефіцієнтом схилової трансформації [4]

$$k_0 = \frac{n+1}{n} \frac{1}{T_0}, \quad (21)$$

де $\frac{n+1}{n}$ - коефіцієнт часової нерівномірності припливу води зі схилів до руслової мережі;

T_0 – тривалість схилового припливу.

З урахуванням (21) рівняння (20) набуде вигляду:

$$q_m = q'_m k_m \frac{T_0}{T_n}, \quad (22)$$

де q'_m – максимальний модуль схилового припливу

$$q'_m = \frac{n+1}{n} \frac{1}{T_0} Y_m = k_0 Y_m, \quad (23)$$

а k_m є співвідношення коефіцієнтів часової нерівномірності схилового припливу і руслового стоку, тобто

$$k_m = \frac{m+1}{m} \Big/ \frac{n+1}{n}. \quad (24)$$

Вираз (22) легко звести до наступного

$$q_m = \frac{q'_m}{1 + \frac{t_p}{T_0}} k_m k_n, \quad (25)$$

де t_p – час руслового добігання повеневої хвилі;

k_n – коефіцієнт, числове значення якого залежить в основному від русло-заплавного регулювання, бо

$$k_n = \frac{T_0 + t_p}{T_n} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta t}{T_0 + t_p}}, \quad (26)$$

Δt - проміжок часу, необхідний для спорожнення русло-заплавної ємності.

Методика визначення параметрів, що входять до (25), викладена у статті Є.Д.Гопченка і М.Г.Сербова [4]. Сутність її полягає у застосуванні до (25) декількох етапів зворотних розрахунків з накладанням фізично обґрунтованих обмежень.

Тепер стосовно переходу від миттєвих значень Q_m до їх середньодобових величин, по яких, власне, й здійснюється проектування гідрографів стоку. В нормативному документі СНіП 2.01.14-83 [1] запропонований перехідний коефіцієнт k_τ , який визначається розмірами водозборів. Зокрема, у межах степової зони він змінюється від 5.5 при $F=0.1$ км² до 1.0 – при $F=5000$ км². З урахуванням k_τ середньодобовий максимум становитиме

$$\tilde{Q}_m = Q_m / k_\tau, \quad (27)$$

де \tilde{Q}_m - середньодобова витрата води.

На наш погляд, таблиця k_τ , наведена у [2], є досить грубим наближенням, особливо в області невеликих водозборів, на яких, звичайно, гідрологічні спостереження не ведуться. Крім того, у діючих рекомендаціях k_τ немає фізичних обмежень зверху, тобто при $F \rightarrow 0$. Для обґрунтування k_τ використаємо рівняння редукційного гідрографа (14). Проінтегруємо його у межах однієї доби і таким чином визначимо середньодобову витрату води \tilde{Q}_m , оскільки

$$\tilde{Q}_m = \int_0^1 Q_t dt = Q_m \left(1 - \frac{1}{m+1} \frac{1}{T_n^m} \right). \quad (28)$$

Звідки

$$k_\tau = Q_m / \tilde{Q}_m = \frac{1}{1 - \frac{1}{m+1} \frac{1}{T_n^m}}, \quad (29)$$

де T_n – тривалість водопілля, год.

Для визначення верхнього фізичного значення k'_τ , у тих чи інших регіональних умовах, звернімось до схилового гідрографа, представленого у редукційному вигляді, аналогічно русловому (14), а саме [5]

$$Q'_t = Q'_m \left[1 - \left(\frac{t}{T_0} \right)^n \right]. \quad (30)$$

Середньодобовий максимум схилового припливу \tilde{Q}'_m за умови, що $T_0 > 1$ доби, є

$$\tilde{Q}'_m = \int_0^1 Q'_t dt = Q'_m \left(1 - \frac{1}{n+1} \frac{1}{T_0^n} \right), \quad (31)$$

а

$$k'_\tau = \frac{1}{1 - \frac{1}{n+1} \frac{1}{T_0^n}}. \quad (32)$$

Аналіз отриманих результатів і можливість їх практичного використання. Для проектування розрахункових гідрографів відповідно до (10) необхідно мати: максимальні середньодобові витрати води (\tilde{Q}_p) і шари стоку (Y_p) забезпеченістю $P\%$, коефіцієнти несиметричності руслових гідрографів k_s , а також тривалість підйому водопілля t_n . Середньодобовий максимум \tilde{Q}_p визначається через його миттєве значення Q_p , яке нами рекомендується встановлювати за допомогою структурного рівняння (25). Параметри, що входять до нього, обґрунтовуються за допомогою матеріалів спостережень гідрологічної мережі постів. Перехідні коефіцієнти k_τ і k'_τ розраховуються за допомогою рівнянь (29) і (32). Зокрема, для степової зони України отримані наступні регіональні залежності:

а) для тривалості весняних водопіль T_n , д.

$$T_n = a + 7.5 \lg(F + 1), \quad (33)$$

де $a=T_0$ і у межах степової зони набуває значень: 2.08, 5.0 і 6.25 діб;

б) для коефіцієнтів часової нерівномірності водопіль

$$\frac{m+1}{m} = 6.0 - 0.75 \lg(F + 1). \quad (34)$$

На рис.2 представлена залежність $k_\tau = f(F)$, обґрунтована за допомогою (29) і (32) та з використанням (33) і (34). Для порівняння на рис.2 нанесені відповідні дані нормативного документа СНІП 2.01.14-83.

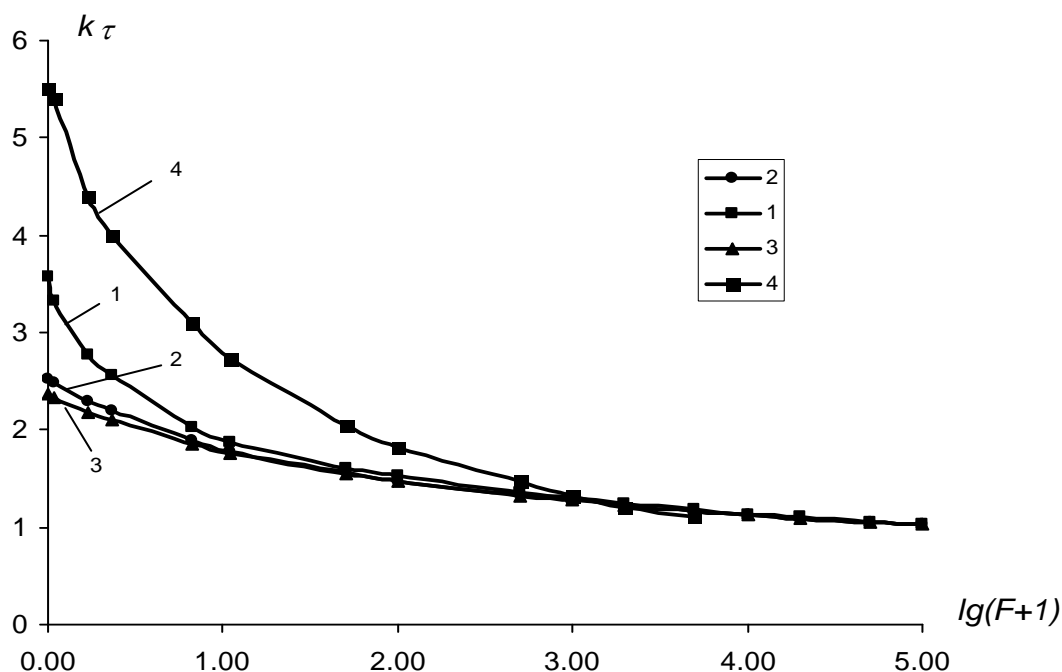


Рисунок 2 - Залежність коефіцієнта k_τ від розмірів водозборів: 1 – при $T_0=50$ год, 2 – при $T_0=120$ год, 3 – при $T_0=150$ год, 4 – за рекомендаціями СНІП 2.01.14-83.

Аналіз залежності $k_\tau = f(F)$ дає підстави для наступних **висновків**:

1. В усьому діапазоні k_τ має спадний вигляд від свого максимального значення (при $F=0$) до майже одиниці (при $F=1000$ км²).

2. Часові значення k_τ , у тому числі й k'_τ , при $F < 1000$ км² залежать від тривалості схилового припливу T_0 і чим вона менше, тим більш високе положення займає крива $k_\tau = f(F)$.

3. Запропоновані авторами формули для розрахунку k_τ дозволяють описати його в усьому діапазоні водозбірних площ, включаючи й невеликі, на яких спостереження за стоком річок на здійснюються.

4. Слід відзначити, що в усьому діапазоні F нормативний документ для степової зони рекомендує більш високі значення k_τ , ніж ті, що обґрунтовуються авторами

статті. Завищення k_T буде призводити до зниження розрахункових гідрографів водопіль.

5. Удосконалена методика проектування гідрографів весняного водопілля річок степової зони України рекомендується для практичного використання.

Список літератури

1. Соколовский Д.Л. Речной сток. - Л.: Гидрометеиздат, 1968. – 538 с.
2. Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 447 с.
3. Огиевский А.В. Основные закономерности в процессах стока на речных бассейнах // Труды НИУ ГУГМС, 1946. – Сер. IV. – Вып.29. – С.33-91.
4. Гопченко Е.Д., Сербов Н.Г. Метод расчета максимального стока весеннего половодья рек Западно-Сибирской равнины // Метеорология, климатология и гидрология, 1990. – Вып.5. – С.79-85.
5. Гопченко Е.Д. О редуции максимальных модулей дождевого стока по площади // Метеорология и гидрология, 1975. - №2. – С.66-71.

К проектированию гидрографов паводков и половодий равнинных рек Украины.

Гопченко Е.Д., Авгайтис С.В.

В статье приводятся научно-методические обоснования построения расчетных гидрографов стока.

Ключевые слова: проектирование гидрографов стока, объемные формулы, коэффициенты превышения суточных максимальных расходов воды.

To planning of hydrographers of floods and high waters of the flat rivers of Ukraine.

Gopchenko E.D., Avgajtis C.V.

The scientifically-methodical grounds in relation to construction of hydrographers calculation of flow are presented in the article.

Keywords: planning of flow hydrographers, volumes formulas, coefficients of exceeding of daily allowance maximal charges of water.