

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ Й ПАРАМЕТРІВ РЕДУКЦІЙНИХ ФОРМУЛ

У статті розглядаються теоретичні аспекти використання в розрахунковій практиці формул редукційного типу.

Ключові слова: редукційні формули, схиловий приплив, максимальний стік, математичне моделювання.

Вступ. Особливості розвитку й використання редукційних формул. Редукційні структури серед існуючих формул максимального стоку знайшли найбільше розповсюдження як у нашій країні, так і за кордоном. Цьому сприяли їхня простота, фізична зрозумілість параметрів і можливість доведення, спираючись на обмежені матеріали спостережень, до розрахункового вигляду. Перші побудовання ґрунтувались на суто емпіричних залежностях максимальних модулів стоку q_m від розміру водозборів F та мали наступний вигляд [1]

$$q_m = \frac{q'_m}{(F+1)^{n_1}}, \quad (1)$$

де q'_m - максимальний модуль схилового припливу, який за умови, що $F \rightarrow 0$, є верхнім граничним значенням для всіх q_m річок того чи іншого регіону;

n_1 - показник редукції максимального модуля стоку при зростанні площі водозборів F , який залежить від генетичного типу паводків або водопіль.

Необхідно зауважити, що не лише в минулому, а навіть у сучасній гідрологічній літературі, параметр q'_m формули (1) помилково ототожнюється з інтенсивністю водовіддачі, тоді як фактично йдеться про модуль схилового припливу. Щоб зрозуміти різницю між ними, досить записати редукційні гідрографи водовіддачі й схилового припливу у вигляді:

- для водовіддачі

$$A_t = A_m \left[1 - \left(\frac{t}{T_e} \right)^{m_1} \right]; \quad (2)$$

- для схилового припливу

$$q'_t = q'_m \left[1 - \left(\frac{t}{T_0} \right)^n \right], \quad (3)$$

де A_t - інтенсивність водовіддачі в момент часу t ;

A_m - максимальна інтенсивність водовіддачі;

T_0 - тривалість схилового припливу, причому

$$T_0 = T_e + t_{cx}; \quad (4)$$

T_e - тривалість водовіддачі;

t_{cx} - тривалість схилового припливу.

Проінтегруємо (2) та (3) по T_e і T_0 відповідно. Тоді

$$Y_{\epsilon} = A_m \frac{m_1}{m_1 + 1} T_{\epsilon}, \quad (5)$$

а

$$Y_{np} = q'_m \frac{n}{n+1} T_0. \quad (6)$$

Враховуючи, що в період формування схилового стоку Y_{ϵ} (шар водовіддачі) мало чим відрізняється від Y_{np} (шар схилового припливу), (5) і (6) можна об'єднати та представити в редакції

$$q'_m = \frac{n+1}{n} \frac{m_1+1}{m_1} \cdot \frac{A_{\epsilon}}{1 + t_{cx}/T_{\epsilon}}, \quad (7)$$

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

$\frac{m_1+1}{m_1}$ - коефіцієнт часової нерівномірності водовіддачі.

Численні дослідження авторів статті свідчать про те, що взагалі має місце наступне співвідношення між коефіцієнтами часової нерівномірності

$$(m_1 + 1)/m_1 \geq (n + 1)/n, \quad (8)$$

тобто

$$\frac{n+1}{n} \frac{m_1+1}{m_1} \leq 1.0. \quad (9)$$

У такому випадку, очевидно, й редуційний коефіцієнт $\frac{n+1}{n} \frac{m_1+1}{m_1} \cdot \frac{A_{\epsilon}}{1 + t_{cx}/T_{\epsilon}}$ буде меншим за одиницю. З цього витікає, що

$$q'_m < A_{\epsilon}. \quad (10)$$

Згодом [2] з'ясувалося, що параметр A_{ϵ} у свою чергу залежить від шару стоку за водопілля та описується рівнянням

$$A_{\epsilon} = k'_0 Y_{\epsilon}. \quad (11)$$

Але більш теоретично обґрунтованою є залежність

$$q'_m = k_0 Y_{np}. \quad (12)$$

В (11) та (12) k'_0 і k_0 , відповідно, коефіцієнти трансформації водовіддачі й схилового припливу, причому теоретично

$$k'_0 = \frac{m_1+1}{m_1} / T_{\epsilon}, \quad (13)$$

а

$$k_0 = \frac{m+1}{m} / T_0. \quad (14)$$

З урахуванням (12)

$$q_m = \frac{k_0 Y_m}{(F+1)^{n_1}}. \quad (15)$$

Сама структура (15) свого часу була використана при підготовці нормативного документа СН 435-72, а потім – й СНіП 2.01.14-83. Щоб відобразити особливості редуцції максимальних модулів стоку у межах невеликих водозборів, формула (15) була дещо модифікована, а саме,

$$q_m = \frac{k_0 Y_m}{(F+b)^{n_1}}, \quad (16)$$

Включення до (15) добавки b фактично призвело до порушення фізичного змісту параметра $k_0 Y_m = q'_m$, оскільки, як видно з (16), при всіх значеннях b , окрім одиниці, $q_m/q'_m < 1.0$. Для врахування уповільнення редуцції в області невеликих водозборів та з метою збереження фізичної вимоги $(q_m/q'_m)_{F=0} = 1.0$ Є.Д.Гопченком [3] було запропоновано структуру (15) диференціювати по показнику степені n_1 . Зокрема,

а) при $F < F_0$

$$q_m = \frac{k_0 Y_m}{(F+1)^{n'_1}}; \quad (17)$$

б) при $F \geq F_0$

$$q_m = \frac{k_0 Y_m}{F^{n_1}} F_0^{n_1 - n'_1}, \quad (18)$$

де n'_1 - показник редуцції максимального модуля в області $F \leq F_0$.

Але при аналізі структури й параметрів редуцційних формул постає більш принципове питання, яке стосується теоретичної моделі, покладеної в основу цих формул. Відомо, що більшість високих весняних водопіль і дощових паводків формуються по типу одномодальних гідрографів. Виходячи з таких постулатів, Д.Л.Соколовський [1] зробив спробу теоретично обґрунтувати редуцційну емпіричну формулу вигляду (1). Схиловий гідрограф було представлено у вигляді

$$q'_m = k'_\phi \frac{Y_m}{T_0}, \quad (19)$$

а русловий

$$q_m = k''_\phi \frac{Y_m}{T_0 + t_p}, \quad (20)$$

де $k'_\phi = k''_\phi$ - коефіцієнти часової нерівномірності схилового й руслового стоку;

t_p - тривалість руслового добігання повеневих або паводкових хвиль.

Поєднуючи (19) та (20), запишемо

$$q_m = \frac{q'_m}{1 + t_p/T_0}. \quad (21)$$

З чисто формальних передумов, тобто шляхом формального порівняння (1) і (21), Д.Л.Соколовський приходять до висновку, що єдиною причиною редуцції максимальних модулів паводків чи водопіль при збільшенні розмірів водозборів є тривалість руслового добігання t_p , оскільки

$$\frac{1}{1 + \frac{t_p}{T_0}} = \frac{1}{(F + 1)^{n_1}}. \quad (22)$$

На жаль, тотожність (22) ним не перевірялась, а висновок про її існування по цей час майже не піддається сумніву. Правда, значно пізніше у роботі [3] вихідна модель Д.Л.Соколовського була піддана більш ретельному розгляду. З цією метою редуційний гідрограф схилового стоку брався у вигляді (3), а русловий – по аналогії з ним, тобто в редакції

$$q_t = q_m \left[1 - \left(\frac{t}{T_n} \right)^{m_2} \right], \quad (23)$$

де q_m - максимальний модуль руслового стоку;

T_n – тривалість водопілля чи паводка.

Інтегрування (3) та (23) по T_0 і T_n з наступним їх об'єднанням дало підставу отримати більш досконалу структуру [3] редуційного типу, аніж (21)

$$q_m = \frac{q'_m}{1 + \frac{t_p}{T_0}} k_n k_m, \quad (24)$$

де k_n і k_m – редуційні коефіцієнти, які, головним чином, ураховують ефекти русло-заплавного регулювання, причому

$$k_n = (T_0 + t_p) / T_n, \quad (25)$$

а

$$k_m = \frac{m_2 + 1}{m_2} \Big/ \frac{n + 1}{n}, \quad (26)$$

$\frac{m_2 + 1}{m_2}$ - коефіцієнт часової нерівномірності руслового стоку.

Порівнюючи між собою (21) і (27), а також (1), очевидно, що

$$\frac{1}{(F + 1)^{n_1}} = \frac{k_n k_m}{1 + \frac{t_p}{T_0}}. \quad (27)$$

У роботах Є.Д.Гопченка [3, 4] піддаються сумнівам ще й питання, пов'язані з можливістю переходу від (24) до більш спрощених структур вигляду (1) та (15). Йдеться про те, що формула (15) може використовуватись лише у тих випадках, коли піддається територіальному осередненню тривалість схилового припливу T_0 . А структура (1) взагалі вимагає вельми жорстких умов, тобто осереднення по території, окрім T_0 , ще й шару стоку Y_m . Наведені ж умови, необхідні для спрощення (24) до рівнів (1) і (21), скоріше слід розглядати як виключення. Наступним і досить проблемним при вивченні структур (1) та (21) постає питання про внесок часу руслового добігання у загальну редуцію максимального модуля q_m .

Методика дослідження. Спочатку (1) та (21) доцільно привести до канонічного вигляду

$$q_m/q'_m = \frac{1}{(F+1)^{n_1}} \quad (28)$$

i

$$q_m/q'_m = \frac{1}{1 + t_p/T_0} \quad (29)$$

З метою дослідження складової правої частини (29), стосовно її внеску у загальну редуцію q_m/q'_m , звернемося до одного з найбільш обґрунтованих варіантів розрахункових формул максимального стоку [5]

$$q_m = q'_m \psi\left(\frac{t_p}{T_0}\right) \varepsilon_F, \quad (30)$$

де q'_m - максимальний модуль схилового припливу

$$q'_m = \frac{n+1}{n} \cdot Y_m / T_0; \quad (31)$$

ε_F - трансформаційна функція, обумовлена русло-заплавним регулюванням;

$\psi\left(\frac{t_p}{T_0}\right)$ - трансформаційна функція розпластування, пов'язана, головним

чином, з тривалістю руслового стоку, і в залежності від співвідношення між t_p і T_0 набуває розрахункового вигляду:

- при $t_p/T_0 = 0$

$$\psi\left(\frac{t_p}{T_0}\right) = 1.0; \quad (32)$$

- при $0 < t_p/T_0 < 1.0$

$$\psi\left(\frac{t_p}{T_0}\right) = 1 - \frac{m+1}{(n+1)(m+n+1)} \left(\frac{t_p}{T_0}\right)^n; \quad (33)$$

- при $1.0 < t_p/T_0 < \infty$

$$\psi\left(\frac{t_p}{T_0}\right) = \frac{n}{n+1} \cdot \frac{T_0}{t_p} \left[\frac{m+1}{m} - \frac{n+1}{m(m+n+1)} \left(\frac{T_0}{t_p}\right)^m \right]; \quad (34)$$

- при $t_p \gg T_0$

$$\psi\left(\frac{t_p}{T_0}\right) = 0. \quad (35)$$

Умови (32) і (35) відповідають верхньому та нижньому граничним значенням функції $\psi\left(\frac{t_p}{T_0}\right)$. В іншому діапазоні $\psi\left(\frac{t_p}{T_0}\right)$ визначається співвідношенням t_p/T_0 , а також часовою динамікою схилового припливу (за допомогою n) і формою водозборів (за допомогою m).

Науково-методична база досліджень внеску часу руслового добігання t_p у загальну редуцію максимального модуля стоку полягала у моделюванні правої частини (29) та функції $\psi\left(\frac{t_p}{T_0}\right)$ за різних співвідношень $\frac{t_p}{T_0}$ - від 0 до 4.0.

Використані матеріали. Математичне моделювання редуційних коефіцієнтів $1/\left(1+\frac{t_p}{T_0}\right)$, з одного боку, та $\psi\left(\frac{t_p}{T_0}\right)$, з іншого, може здійснюватись без використання якихось вихідних даних спостережень, оскільки (29) спирається лише на безрозмірний комплекс $\frac{t_p}{T_0}$, а (32) – (35) потребують ще й додаткової інформації по n та m . Степеневий показник m у рівнянні кривих ізохрон, відповідно до [6], брався на рівні: 2.0 (невеликі водозбори); 1.0 (середнього розміру водозбори); 0.5 (розгалужені річкові системи), а n - на рівнях: 1.0; 0.5; 0.25. Крім того, для перевірки деяких положень проблеми, що розглядається, були залучені характеристики максимального стоку весняного водопілля в басейні р. Сіверський Донець (з діапазоном водозбірних площ від 31 до 73200 км²).

Отримані результати та їх аналіз. Математичне моделювання складових загальної редуції здійснювалося по декількох варіантах:

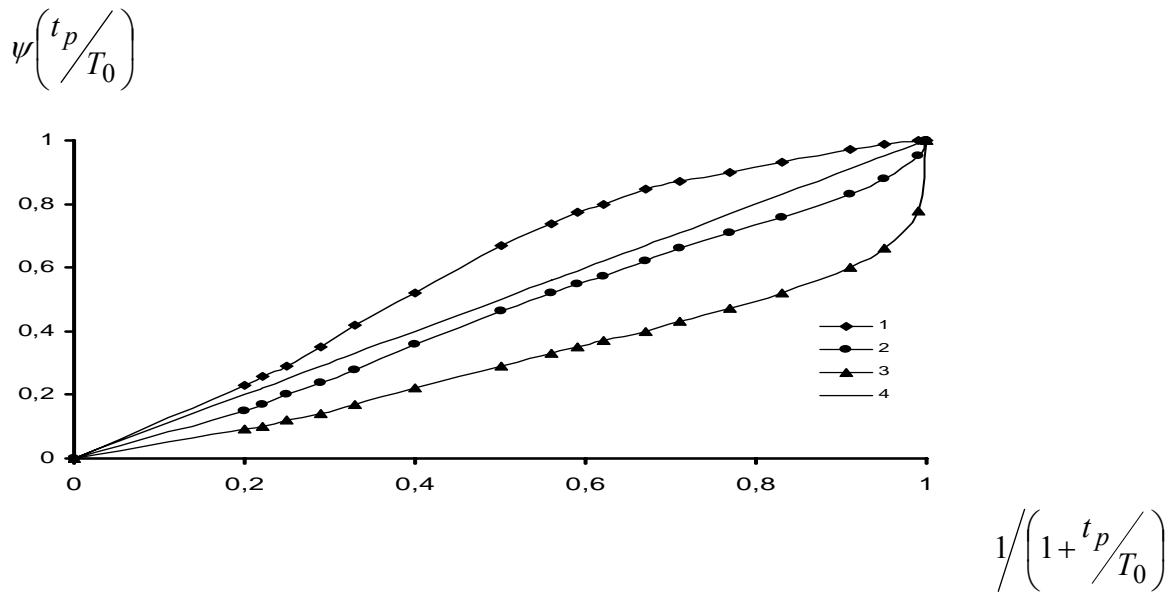
1. Функція $\psi\left(\frac{t_p}{T_0}\right)$ розраховувалась при співвідношеннях $\frac{t_p}{T_0}$ від 0 до 4.0 та при різних значеннях n (1.0; 0.5; 0.25). Показник степені у рівнянні кривих ізохрон брався постійним – на рівні 1.0.

2. Розрахунки функції $\psi\left(\frac{t_p}{T_0}\right)$ здійснювались при тому ж діапазоні $\frac{t_p}{T_0}$, але вже за різних значень m (2.0; 1.0; 0.5) та фіксованій на рівні одиниці величині n .

3. Функція $\psi\left(\frac{t_p}{T_0}\right)$ розраховувалась за матеріалами спостережень в басейні р. Сіверський Донець.

4. Редуційний коефіцієнт $1/\left(1+\frac{t_p}{T_0}\right)$, що є правою частиною (29), визначався по всіх варіантах за єдиною схемою, тобто в залежності лише від співвідношення $\frac{t_p}{T_0}$.

Результати моделювання $\psi\left(\frac{t_p}{T_0}\right)$ і $1/\left(1+\frac{t_p}{T_0}\right)$ за першим варіантом наочно ілюструються рис.1. З нього видно, що при $n=1.0$ має місце суттєве завищення значень $\psi\left(\frac{t_p}{T_0}\right)$ у порівнянні з $1/\left(1+\frac{t_p}{T_0}\right)$, за виключенням граничних меж цих параметрів при $\frac{t_p}{T_0}=0$ і $t_p \gg T_0$, коли вони співпадають на рівні одиниці та нуля. Протилежні, але теж значні відхилення $\psi\left(\frac{t_p}{T_0}\right)$ і $1/\left(1+\frac{t_p}{T_0}\right)$ від лінії рівних значень, спостерігаються в усій області й при $n=0.25$.



1 - $n=1.0$; 2 - $n=0.5$; 3 - $n=0.25$; 4 – лінія рівних значень

Рисунок 1 – Співвідношення між трансформаційними функціями

$$\psi\left(\frac{t_p}{T_0}\right) \text{ і } \frac{1}{\left(1 + \frac{t_p}{T_0}\right)} \text{ при } m=1.0 \text{ і різних } n.$$

Майже збіжні величини $\psi\left(\frac{t_p}{T_0}\right)$ і $\frac{1}{\left(1 + \frac{t_p}{T_0}\right)}$ мають місце при $n=0.5$. З рис.1 впливає дуже важливий висновок про суттєвий внесок у редукцію розпластування паводків і водопіль часової динаміки припливу води зі схилів до руслової мережі. Але вона знаходить своє відображення лише у структурі $\psi\left(\frac{t_p}{T_0}\right)$ і зовсім не враховується параметром $\frac{1}{\left(1 + \frac{t_p}{T_0}\right)}$.

Результати моделювання трансформаційних функцій $\psi\left(\frac{t_p}{T_0}\right)$ і $\frac{1}{\left(1 + \frac{t_p}{T_0}\right)}$ за другим варіантом представлені на рис.2. Очевидно, що порівняно з першим варіантом, коли змінним був степеневий показник n , а m – залишався фіксованим, у цьому, навпаки, змінювався m , а n залишався фіксованим (на рівні одиниці). Рис.2 свідчить про те, що за всіх степеневих показників m і в усьому діапазоні $\frac{t_p}{T_0}$ ординати функції $\psi\left(\frac{t_p}{T_0}\right)$ мають більш високі величини, порівняно з $\frac{1}{\left(1 + \frac{t_p}{T_0}\right)}$, окрім граничних значень, які відносяться до $\frac{t_p}{T_0} = 0$ і $t_p \gg T_0$.

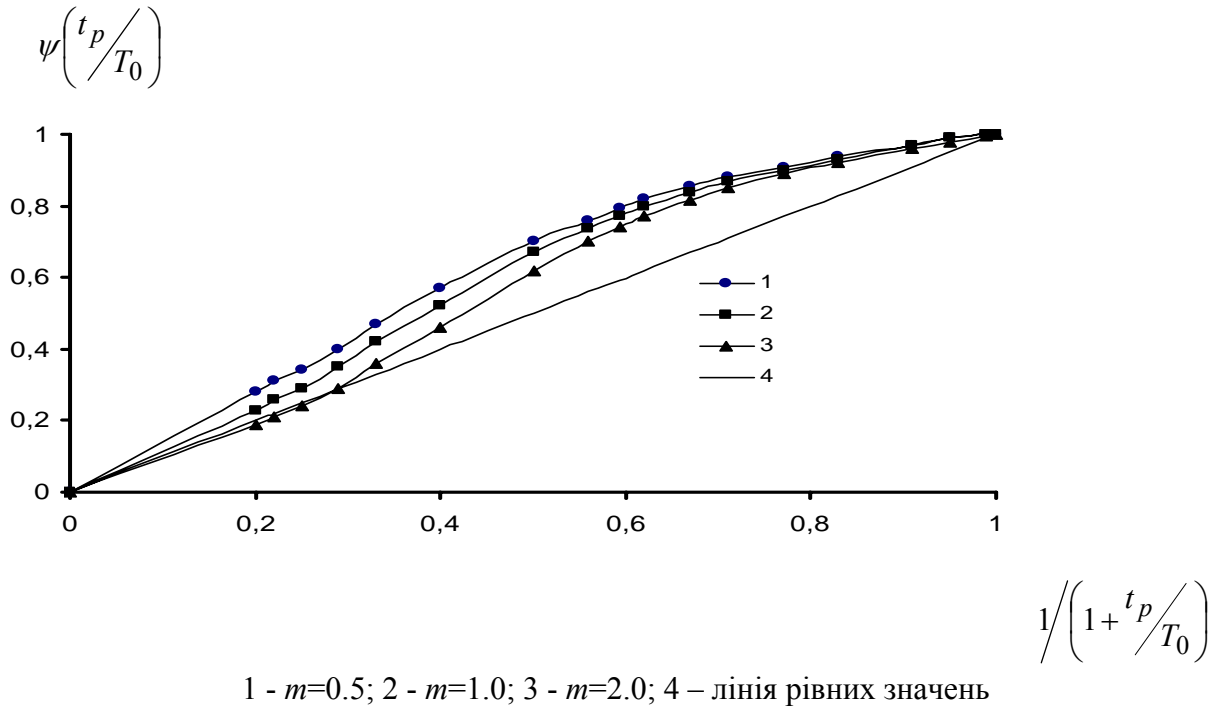


Рисунок 2 - Співвідношення між трансформаційними функціями

$$\psi\left(t_p/T_0\right) \text{ і } 1/\left(1+t_p/T_0\right) \text{ при } n=1.0 \text{ і різних } m.$$

Найбільші відхилення $\psi(t_p/T_0)$ від ліній рівних значень відносяться до $m=2.0$, тобто до невеликих водозборів. Безумовний інтерес представляє порівняння між собою редуційних коефіцієнтів $\psi(t_p/T_0)$ і ε_F , які входять складовими до (30) і враховують розпластування під впливом часу руслового добігання і русло-заплавного регулювання, оскільки

$$q_m/q'_m = \psi\left(t_p/T_0\right)\varepsilon_F. \quad (36)$$

Математичне моделювання ε_F , виходячи безпосередньо з (36), слід вважати досить складним завданням, бо редуційні коефіцієнти руслової трансформації повеневих хвиль $\psi(t_p/T_0)$ і ε_F залежать від різних аргументів - t_p/T_0 та F . Тому подальші дослідження структури й параметрів редуційних формул проводились на матеріалах спостережень за максимальним стоком весняного водопілля в басейні р.Сіверський Донець. Перш за все, за допомогою рис.3 доводиться, що вплив на трансформацію водопіль русло-заплавного регулювання, майже в усьому діапазоні водозбірних площ, перевищує їх розпластування за рахунок тривалості руслового добігання.

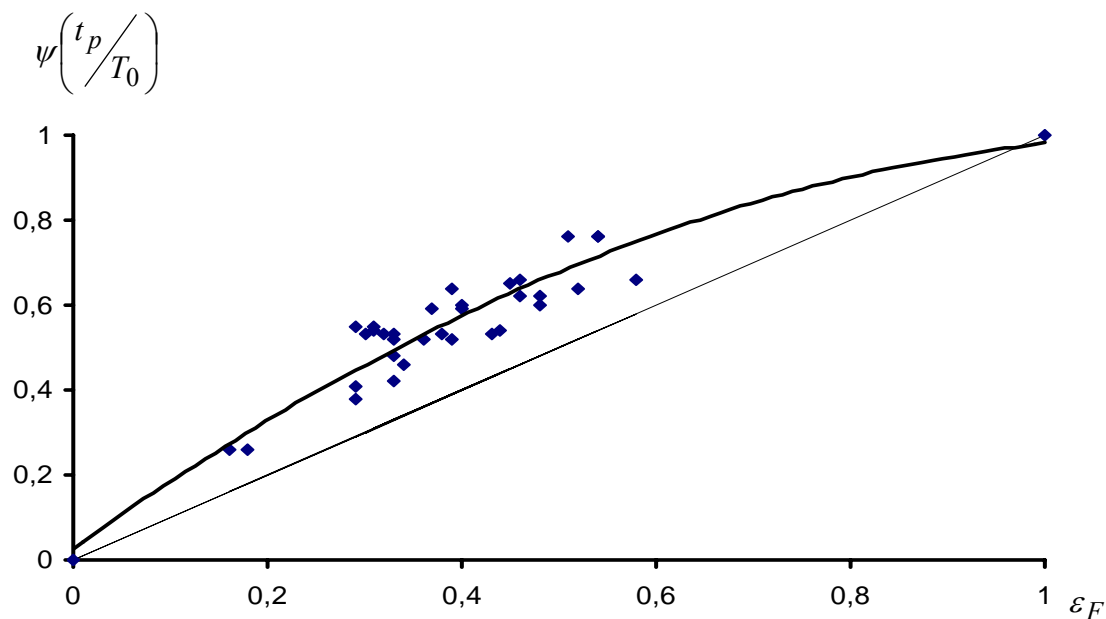
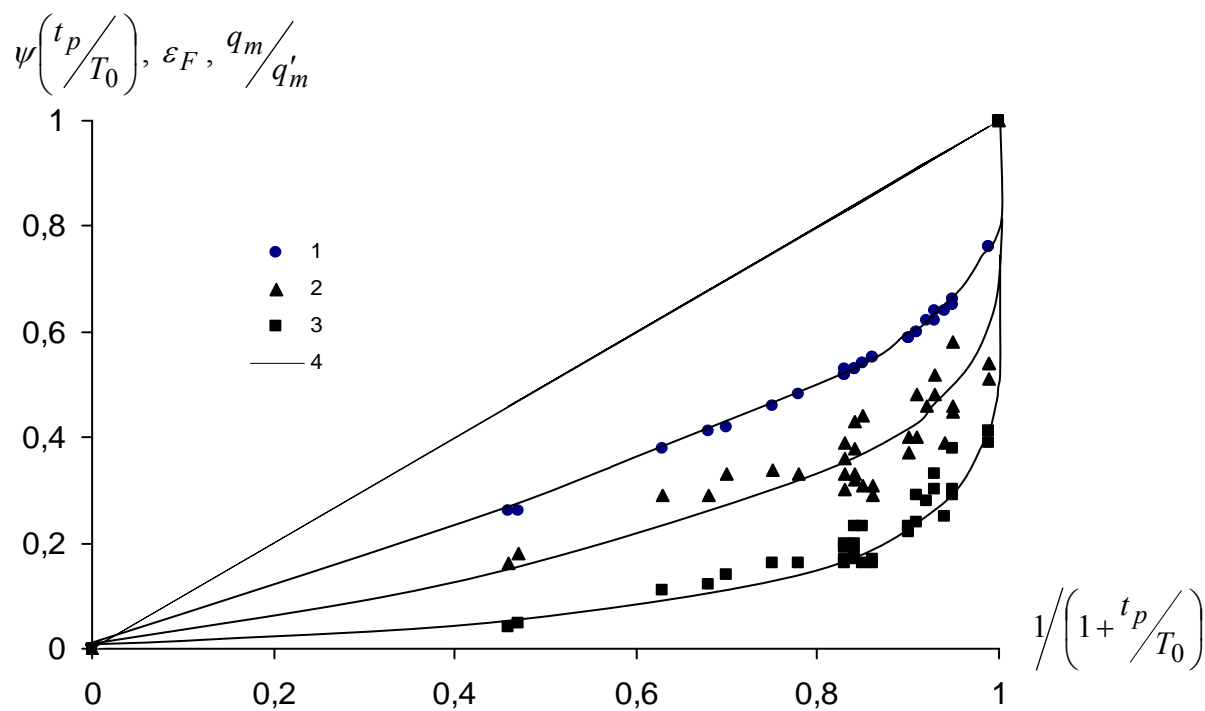


Рисунок 3 – Залежність між складовими загальної редукції максимальних модулів стоку весняного водопілля в басейні р. Сіверський Донець.

За допомогою рис.4 автори засвідчують, що від лінії рівних значень (по відношенню до абсциси) суттєво відрізняються не лише криві загальної редукції q_m/q'_m , але й її складові - $\psi(t_p/T_0)$ і ε_F .



1 - $\psi(t_p/T_0)$; 2 - ε_F ; 3 - q_m/q'_m ; 4 – лінія рівних значень
Рисунок 4 – Залежність між складовими загальної редукції.

Більш того, як видно з рис.4, в усьому діапазоні значень $1/\left(1 + \frac{t_p}{T_0}\right)$ редукція за рахунок русло-заплавного регулювання суттєво перевищує складову, обумовлену розпластуванням повенеких хвиль за рахунок часу руслового добігання.

Висновки. На основі виконаного дослідження можна зробити наступні висновки:

1. Теоретичні обґрунтування структури редукційних формул, здійснені Д.Л.Соколовським, не відповідають повною мірою природі формування максимального стоку на річкових водозборах. Зокрема, базова вихідна модель Д.Л.Соколовського ніяким чином не враховує особливості часової динаміки схилового припливу води до руслової мережі, а також форми водозборів.

2. Авторами доведено, що теоретична модель Д.Л.Соколовського взагалі відображає лише одну складову загальної редукції – регулювання водопільних хвиль, пов'язаних з тривалістю руслового добігання. Але більш-менш задовільна збіжність функцій $\psi(t_p/T_0)$ і $1/\left(1 + \frac{t_p}{T_0}\right)$ має місце при коефіцієнті часової нерівномірності схилового припливу, наближеною до 3.0.

При $\frac{n+1}{n} = 2$ в усьому діапазоні $\psi(t_p/T_0) > 1/\left(1 + \frac{t_p}{T_0}\right)$ і, навпаки, при $\frac{n+1}{n} = 5$ - значення $\psi(t_p/T_0)$ менші за $1/\left(1 + \frac{t_p}{T_0}\right)$.

3. Форма водозборів теж впливає на характеристики редукції максимального стоку, але в меншій степені, аніж форма гідрографів схилового припливу води до руслової мережі.

4. На матеріалах спостережень за максимальним стоком в басейні р. Сіверський Донець доведено, що внесок $1/\left(1 + \frac{t_p}{T_0}\right)$ у рази відрізняється не лише у порівнянні з загальною редукцією максимального модуля, але й відносно її складових - $\psi(t_p/T_0)$ та ε_F окремо.

5. Матеріали спостережень за максимальним стоком в басейні р. Сіверський Донець свідчать також про те, що більший внесок у загальну редукцію максимальних модулів весняного водопілля має не розпластування повенеких хвиль під впливом часу руслового добігання, а природні ефекти, пов'язані з процесами русло-заплавного регулювання.

6. Головний же висновок стосується наступних положень:

6.1. Емпіричні структури редукційних формул, як доведено, мають досить обмежені сфери їх використання – лише за умови осереднення по території тривалості схилового припливу, а в окремих випадках передбачається осереднення у просторі ще й шарів стоку весняного водопілля.

6.2. Виходячи з цих та інших міркувань, автори вважають подальше використання в Україні нормативного документа СНіП 2.01.14-83 не виправданим як у теоретичному, так і в прикладному відношеннях.

Список літератури

1. Соколовский Д.Л. Гидрологические и водохозяйственные расчеты при проектировании малых ГЭС. – Л.: Гидрометеиздат, 1946. – 217с.
2. Воскресенский К.П. Гидрологические расчеты при проектировании сооружений на малых реках, ручьях и временных водотоках. – Л.: Гидрометеиздат, 1956. – 467с.
3. Гопченко Е.Д. О редукционных формулах максимального стока // Труды УкрНИГМИ, 1980. – Вып.175- С.85-93.
4. Гопченко Е.Д., Романчук М.Е., Бурлуцкая М.Э., Хоанг Тхи Лан Ань. О структурных особенностях формул редукционного типа и области их применения // Метеорологія, кліматологія та гідрологія, 2005. – Вип.49. – С.424-432.
5. Гопченко Є.Д., Романчук М.Є. Уніфікація розрахункових схем максимальних витрат води річок // Зб. „Гідрометеорологія і охорона навколишнього середовища-2002”. – Ч.1. – Одеса. – 2003. – С.6-12.
6. Гушля А.В. Влияние формы бассейна на величину максимальных расходов дождевых паводков // Метеорологія, кліматологія и гідрологія, 1972. – Вип.8.- С.155-158.

Исследование структуры и параметров редукционных формул.

Гопченко Е.Д., Бурлуцкая М.Е.

В статье рассматриваются теоретические аспекты использования в расчетной практике формул редукционного типа.

Ключевые слова: *редукционные формулы, склоновый сток, максимальный сток, математическое моделирование.*

Research of structure and parameters of reduction formulas.

Gopchenko E.D., Burlutskaya M.E.

The theoretical aspects of the use in estimate practice of formulas of reduction type are examined in the article.

Keywords: *reduction formulas, slope runoff, maximal runoff, mathematical design.*