

ГІДРОЛОГІЯ, ВОДНІ РЕСУРСИ

УДК 556.166

Є.Д. Гопченко

СУЧАСНА НОРМАТИВНА БАЗА В ГАЛУЗІ МАКСИМАЛЬНОГО СТОКУ ТА ШЛЯХИ ЇЇ УДОСКОНАЛЕННЯ

У статті подано аналіз найбільш відомих формул максимального стоку, з'ясовано відмінності між ними та недоліки, а також теоретично обґрунтовано наукові і методичні підходи щодо побудови нової нормативної бази.

Аналіз сучасного стану в галузі нормування характеристик максимального стоку

Починаючи з 70-х років минулого сторіччя, в Україні для нормування розрахункових характеристик максимального стоку весняного водопілля і дощових паводків знайшли широке використання формули редуційного типу, які за своїм змістом слід віднести до напівемпіричних. Зокрема, для весняного водопілля запроваджена структура, яка має наступний вигляд [8]:

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

де q_m – максимальний модуль; k_0 – так званий коефіцієнт „дружності” весняного водопілля; Y_m – шар стоку; F – площа водозборів; b – емпіричний коефіцієнт, який використовується у нормативних документах для врахування зменшення редуції у межах невеликих водозборів. Його нормовано таким чином, що він приймає значення залежно від географічної зони (1, 2 або 10).

Щоб дослідити структуру (1) за різних значень b , запишемо у параметричному вигляді вираз стосовно модуля схилового припливу q'_m [6]:

$$q'_m = \frac{n+1}{n} \frac{1}{T_0} Y_m = k_0 Y_m, \quad (2)$$

де $\frac{n+1}{n}$ – коефіцієнт нерівномірності (у часі) припливу води зі схилів до руслової мережі; T_0 – тривалість схилового припливу.
З урахуванням виразу (2) формула (1) набуде вигляду:

$$q_m = \frac{q'_m}{(F + b)^{n_1}}. \quad (3)$$

Звідки визначимо коефіцієнт загальної редукції максимального модуля q_m/q'_m , тобто:

$$q_m / q'_m = \frac{1}{(F + b)^{n_1}}. \quad (4)$$

На рис. 1 наводяться редукційні криві q_m/q'_m у широкому діапазоні F залежно від нормованих значень $b = 1; 2; 10 \text{ км}^2$.

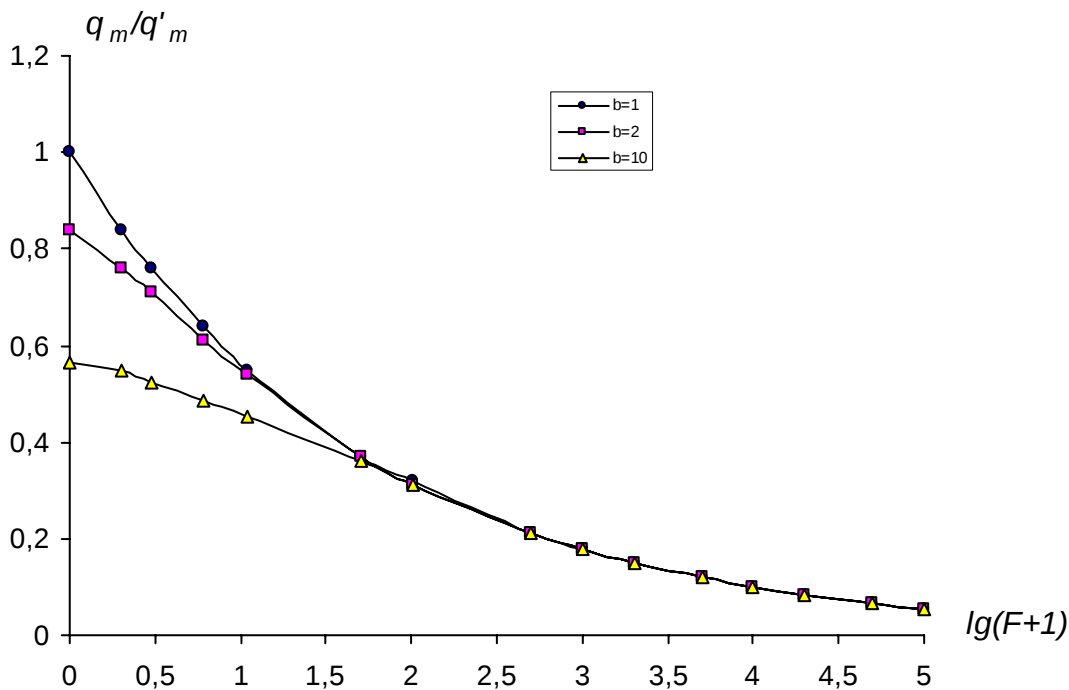


Рис. 1. Залежність редукційного коефіцієнта q_m/q'_m від розмірів водозборів ($b = 1; 2; 10 \text{ км}^2$, а $n_1 = 0,25$)

Із рис. 1 видно, що за $b > 1$, у межах невеликих водозборів має місце суттєве заниження результатів і тим більше, чим більшою є добавка у знаменнику b . Навіть цього аналізу достатньо для того, щоб зробити висновок про невідповідність структури (1) досліджуваному явищу.

Стосовно розрахунку максимальних модулів стоку дощових паводків слід звернути увагу на те, що для різних площ водозборів використовують різні за своєю структурою [9] формули:

а) при $F > 200 \text{ км}^2$

$$q_m = q_{200} \left(\frac{200}{F} \right)^{n_1}; \quad (5)$$

б) при $F < 200 \text{ км}^2$

$$q_m = \bar{\psi}(\tau) H_0 \cdot \eta, \quad (6)$$

де q_{200} – штучно приведений до $F = 200 \text{ км}^2$ максимальний модуль стоку у формулі (1); $\bar{\psi}(\tau)$ – редуційна крива середньої за час τ інтенсивності опадів; H_0 – добовий максимум опадів у теплу частину року; η – збірний коефіцієнт стоку.

До недоліків виразу (5) необхідно віднести необґрунтованість з методичного погляду картування параметра q_{200} . За дослідженнями авторів [5], у такому вигляді (5) він підлягає районуванню, а не відображенню за допомогою ізоліній.

Для подальшого аналізу будемо вважати, що шар опадів H_0 у формулі (6) співпадає з їхньою кількістю за окремий дощ H_m . У такому випадку:

$$q_m = \bar{\psi}(\tau) Y_m, \quad (7)$$

де Y_m – шар стоку, причому:

$$Y_m = H_m \cdot \eta. \quad (8)$$

Виходячи з теорії руслових ізохрон, для невеликих водозборів залежно від співвідношення між часом руслового добігання t_p і тривалістю схилового припливу T_0 , можна записати такі розрахункові вирази:

а) при $t_p < T_0$:

$$q_m = \frac{Y_{t_p}}{t_p}; \quad (9)$$

б) при $t_p \geq T_0$:

$$q_m = \frac{Y_m}{t_p}. \quad (10)$$

В узагальненому вигляді:

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

де φ - коефіцієнт повноти схилового припливу, причому:

а) при $t_p < T_0$:

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

б) при $t_p \geq T_0$:

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

Поєднавши вирази (7) та (11), з урахуванням формул (12) і (13), маємо таке:

а) при $t_p < T_0$:

$$\bar{\psi}(\tau) = \frac{\varphi}{t_p} = \frac{n+1}{n} \frac{1}{T_0} \left[1 - \frac{1}{n+1} \left(\frac{t_p}{T_0} \right)^n \right]; \quad (14)$$

б) при $t_p \geq T_0$:

$$\bar{\psi}(\tau) = \frac{\varphi}{t_p} = \frac{1}{t_p}. \quad (15)$$

З формул (14) і (15) видно, що функція редукції опадів у часі $\bar{\psi}(\tau)$ штучно й невиправдано використовується як трансформаційна функція. Отже, формула граничної інтенсивності (6) взагалі не має належного теоретичного обґрунтування.

Для кращого розуміння явища об'єкта, що досліджується, наведемо концептуальну схему формування стоку у вигляді двох операторів трансформації: „опад-схиловий приплив” і „схиловий приплив-русовий стік”. Щоб побудувати формули максимального стоку, потрібно й достатньо розглядати лише другий оператор.

Теоретичні обґрунтування сучасної нормативної бази в галузі максимального стоку

Вирішити поставлене завдання можливо за допомогою одного з двох підходів: геометричного (на підставі схематизації схилового і

руслового гідрографів) або шляхом використання моделі руслових ізохрон.

Для зручності, розглядаючи перший підхід, обидва гідрографи запишемо у редукційному вигляді:

а) схиловий стік:

$$q'_t = q'_m \left[1 - \left(\frac{t}{T_0} \right)^n \right]; \quad (16)$$

б) русловий стік:

$$q_t = q_m \left[1 - \left(\frac{t}{T_n} \right)^m \right], \quad (17)$$

де T_n – тривалість водопілля чи паводка.

Після інтегрування виразів (16) і (17) відповідно по T_0 і T_n та поєднання результатів отримаємо базову структуру:

$$q_m = \frac{q'_m}{1 + \frac{t_p}{T_0}} k_n k_m, \quad (18)$$

$$\text{де } k_n = \frac{T_0 + t_p}{T_n}, \text{ а } k_m = \frac{m+1}{m} \bigg/ \frac{n+1}{n}.$$

З метою спрощення (18), розглянемо деякі часткові випадки, а саме:

1. За умови, що в межах окремої території можна осереднити T_0 , будемо мати:

$$q_m = \frac{k_0 Y_m}{(F+1)^{n_1}}, \quad (19)$$

у якому:

$$\frac{k_n k_m}{1 + \frac{t_p}{T_0}} = \frac{1}{(F+1)^{n_1}}. \quad (20)$$

2. Якщо до першої умови додати ще й можливість осереднення по території шару стоку Y_m , то формула (18) зводиться до вигляду:

$$q_m = \frac{q'_m}{(F+b)^{n_1}}, \quad (21)$$

де q'_m – максимальний модуль схилового припливу, який підлягає районуванню, але не відображенню за допомогою ізоліній, що у нормативному документі запроваджено стосовно до q_{200} .

3. Якщо немає підстав щодо просторового осереднення хоча б T_0 , спрощення виразу (18) до рівнів формул (19) і (21) неможливе. Таким чином, формули (19) і (21), а як наслідок, і (1) та (3) мають досить обмежене використання.

Другий підхід спирається на теоретичну модель руслових ізохрон, яка може бути реалізована у вигляді балансового рівняння, наприклад [2]:

$$V \frac{\partial \omega}{\partial x} + \frac{1}{\varepsilon'_n} \frac{\partial \omega}{\partial t} = \alpha q'_t B_t, \quad (22)$$

де V – швидкість руслового добігання; ε'_n – коефіцієнт русло-заплавного регулювання; α – коефіцієнт щільності гідрографічної мережі; B_t – ширина водозборів по ізохронах руслового добігання або в розгорнутому варіанті, що відомий під назвою „розгорнутої генетичної формули”.

Інтегрування формули (22), виконане А.М. Бефані [2], дало змогу обґрунтувати розрахункові структури для визначення максимальних модулів стоку залежно від співвідношення між t_p і T_0 . Зокрема:

а) при $t_p < T_0$:

$$q_m = \frac{Y_{t_p}}{t_p} k_1 \varepsilon'_n; \quad (23)$$

б) при $t_p \geq T_0$:

$$q_m = \frac{Y_m}{t_p} k_2 \varepsilon'_n; \quad (24)$$

де k_1 і k_2 – гідрографічні коефіцієнти.

Недоліки рівнянь (22), (23) і (24) полягають у наступному:

1. В осередненні по території коефіцієнта щільності гідрографічної мережі α .
2. У невизначеності верхнього граничного значення q_m , оскільки при $t_p \rightarrow 0$ має місце невизначеність вигляду $0/0$.
3. Розрахункові структури (23) і (24) не відображають у структурних побудованнях наявних причинно-наслідкових зв'язків у ланцюжковій трансформації „схилловий приплив – русловий стік”.

Для усунення цих та деяких інших недоліків викладеної вище науково-методичної бази в галузі максимального стоку автором статті пропонується за вихідну прийняти розгорнутий варіант моделі руслових

ізохрон. Складовими такої моделі є гідрограф схилового припливу, функція ізохрон руслового добігання і русло-заплавне регулювання.

Реалізується вона за допомогою інтегральних рівнянь:

а) при $t_p < T_0$:

$$Q_m = V \int_0^{t_p} q'_t f_t \varepsilon_t dt; \quad (25)$$

б) при $t_p \geq T_0$:

$$Q_m = V \int_0^{T_0} q'_t f_t \varepsilon_t dt \quad (26)$$

Якщо взяти до уваги, що швидкість руху паводкових хвиль незначно залежить від розмірів водозборів, то справедливою буде тотожність:

$$f_t = f_m \left[1 - \left(\frac{t}{t_p} \right)^m \right] = B_m \left[1 - \left(\frac{t}{t_p} \right)^m \right]. \quad (27)$$

Отже, замість формул (25) і (26) можна записати:

а) при $t_p < T_0$:

$$Q_m = V \int_0^{t_p} q'_t B_t \varepsilon_t dt; \quad (28)$$

б) при $t_p \geq T_0$:

$$Q_m = V \int_0^{T_0} q'_t B_t \varepsilon_t dt. \quad (29)$$

Цим виразам (28) і (29) надамо їх спрощені вирішення:

а) при $t_p < T_0$:

$$(Q_m)_{cn} = V \bar{\varepsilon}_{t_p} \int_0^{t_p} q'_t B_t dt; \quad (30)$$

б) при $t_p \geq T_0$:

$$(Q_m)_{cn} = V \bar{\varepsilon}_{t_p} \int_0^{T_0} q'_t B_t dt. \quad (31)$$

Введемо позначення:

$$\frac{Q_m}{(Q_m)_{cn}} = k_\varepsilon. \quad (32)$$

Тоді:

а) при $t_p < T_0$:

$$Q_m = V\varepsilon_F \int_0^{t_p} q'_t B_t dt; \quad (33)$$

б) при $t_p \geq T_0$:

$$Q_m = V\varepsilon_F \int_0^{T_0} q'_t B_t dt, \quad (34)$$

де $\varepsilon_F = \bar{\varepsilon}_{t_p} k_\varepsilon$ або $\varepsilon_F = \bar{\varepsilon}_{T_0} k_\varepsilon$ (залежно від співвідношення t_p і T_0).

Інтегрування формул (33) і (34), з урахуванням (16) і (26) дає наступне:

а) при $t_p < T_0$:

$$q_m = q'_m \left[1 - \frac{m+1}{(n+1)(m+n+1)} \left(\frac{t_p}{T_0} \right)^n \right] \varepsilon_F; \quad (35)$$

б) при $t_p \geq T_0$:

$$q_m = q'_m \frac{n}{n+1} \frac{T_0}{t_p} \left[\frac{m+1}{m} - \frac{n+1}{m(m+n+1)} \left(\frac{T_0}{t_p} \right)^m \right] \varepsilon_F, \quad (36)$$

де q_m – максимальний модуль руслового стоку.

Очевидно, що вирази у квадратних дужках є за своєю сутністю редуційними функціями, які залежать від співвідношення t_p / T_0 , форми водозборів і динаміки припливу води зі схилів до руслової мережі, причому:

а) при $t_p < T_0$:

$$\psi \left(\frac{t_p}{T_0} \right) = 1 - \frac{m+1}{(n+1)(m+n+1)} \left(\frac{t_p}{T_0} \right)^n; \quad (37)$$

б) при $t_p \geq T_0$:

$$\psi\left(\frac{t_p}{T_0}\right) = \frac{n}{(n+1)} \frac{T_0}{t_p} \left[\frac{m+1}{m} - \frac{n+1}{m(m+n+1)} \left(\frac{T_0}{t_p}\right)^m \right]. \quad (38)$$

До формул (37) і (38) слід додати ще два дуже важливих варіанти її, а саме:

в) $t_p / T_0 = 0$:

$$\psi\left(\frac{t_p}{T_0}\right) = 1.0; \quad (39)$$

г) при $t_p \gg T_0$:

$$\psi\left(\frac{t_p}{T_0}\right) = 0. \quad (40)$$

Аналіз параметрів розрахункової методики

Для того, щоб мати уявлення про можливий вплив на $\psi(t_p / T_0)$ форми гідрографів схилового припливу, здійснимо розрахунки трансформаційної функції розпластування за різних значень n (1,0; 0,5; 0,25). Результати представлено у вигляді рис. 2, з якого видно, що, з одного боку, функція $\psi(t_p / T_0)$ суттєво впливає на розпластування паводкових хвиль, а з іншого – вона залежить ще й від характеру припливу води зі схилів до руслової мережі. Особливо трансформувальні ефекти відбуваються на досить невеликих водозборах (при $t_p / T_0 < 0.5$), а потім поступово характер убуття функції $\psi(t_p / T_0)$ дещо уповільнюється. Так само на трансформацію паводків і водопіль впливає також і форма водозборів. За дослідженнями [7], рівнинні річки України відзначаються m у межах від 2,0 (невеликі водозбори) до 0,5 (розгалужені річкові системи). На рис. 4 наведено модельні криві $\psi(t_p / T_0)$ за різних значень m у рівнянні (27). На його підставі можна зробити висновок про те, що $\psi(t_p / T_0)$ майже в усьому діапазоні t_p / T_0 від m має незначну залежність. І взагалі, без великих похибок, особливо при $t_p / T_0 < 1.0$, можна приймати $m = 1,0$, що суттєво спрощує розрахунок функції $\psi(t_p / T_0)$. Узагальнюючи формули (35) і (36), з урахуванням формул (37-40), розрахункова структура для нормування характеристик максимального стоку набуде вигляду:

$$q_m = q'_m \psi(t_p / T_0) \varepsilon_F \cdot r, \quad (41)$$

де r – коефіцієнт редукції q_m під впливом озер, водосховищ, ставків проточного типу; q'_m – модуль схилового припливу, який розраховується за рівнянням (2).

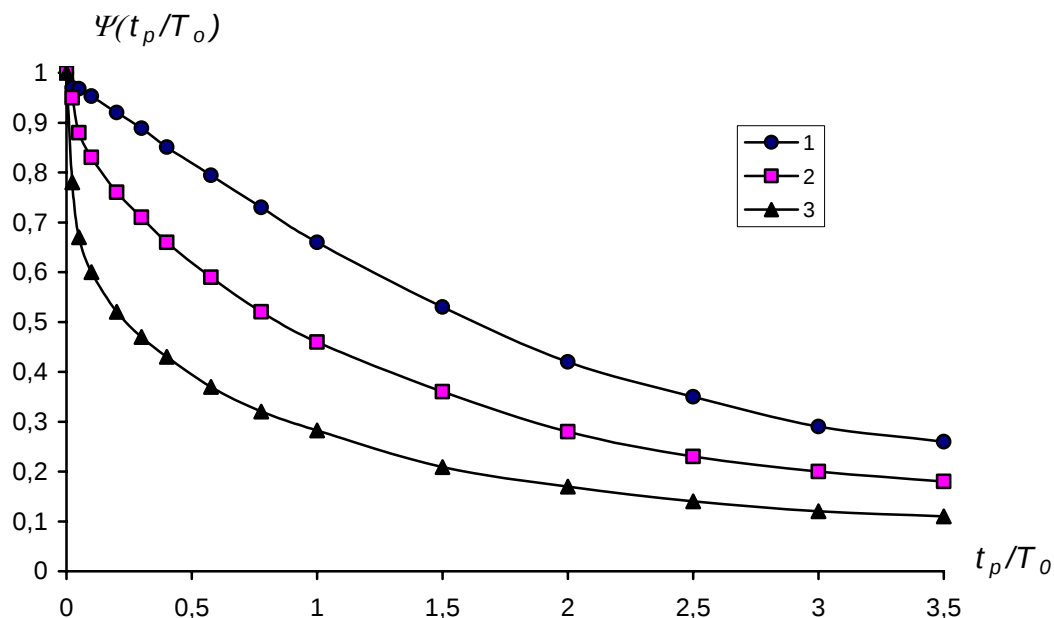


Рис. 2. Залежність трансформаційної функції розпластування від співвідношення t_p/T_0 (при $m = 1,0$): 1. $n = 1,0$; 2. $n = 0,5$; 3. $n = 0,25$

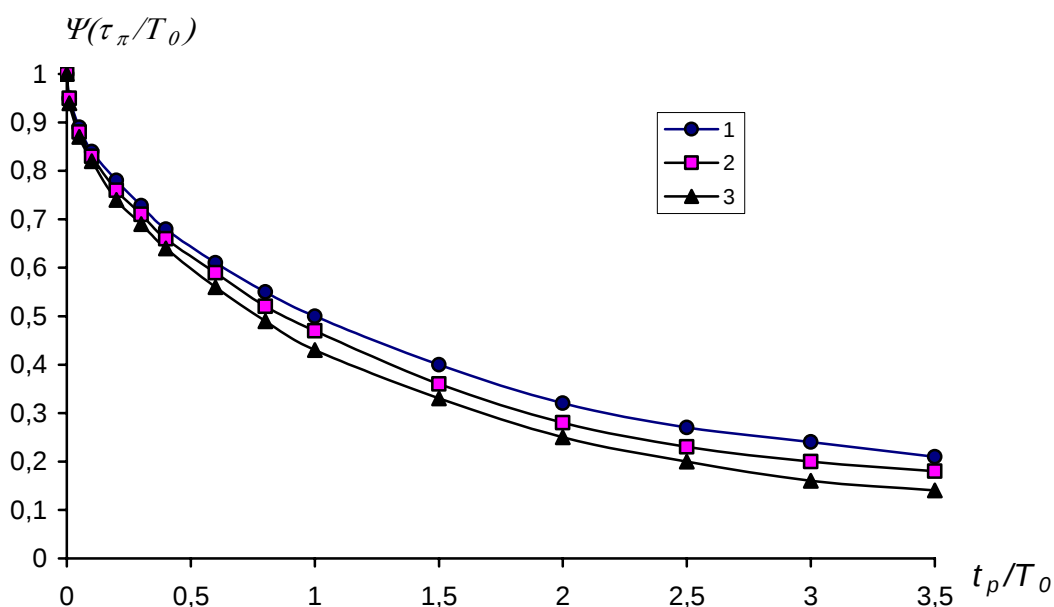


Рис. 3. Залежність трансформаційної функції розпластування від співвідношення t_p/T_0 (при $n = 1,0$): 1. $m = 0,5$; 2. $m = 1,0$; 3. $m = 2,0$

Науково-методичні підходи до визначення параметрів, які описують основні риси гідрографів схилового припливу (зокрема, T_0 і $\frac{n+1}{n}$), досить ґрунтовно викладені у роботах [3, 4, 6]. При цьому варто зупинитися на коефіцієнті русло-заплавного регулювання ε_F . Спеціальних спостережень за цим трансформувальним параметром в системі гідрологічних вимірювань на річках не проводиться. Тому пропонується визначити його зворотним шляхом з виразу (41), тобто:

$$\varepsilon_F = \left(q_m / q'_m \right) / \left[\psi \left(t_p / T_0 \right) \cdot r \right]. \quad (42)$$

Якщо вдається просторово узагальнити q_m / q'_m залежно від розміру водозборів, то формула (42) матиме вигляд:

$$\varepsilon_F = \frac{1}{(F+1)^{n_1}} / \left[\psi \left(t_p / T_0 \right) \cdot r \right]. \quad (43)$$

У розрахункових побудованнях ε_F надається у табличній формі з одним входом – площею водозбору F .

Висновки

Аналітичний огляд сучасної нормативної бази в галузі максимального стоку, яка використовується досі й в Україні, свідчить про суттєві теоретичні й методичні її недоліки. Замість напівемпіричних формул редукційного типу і граничної інтенсивності автор пропонує більш досконалу з теоретичного погляду розрахункову базу, яка ґрунтується на моделі руслових ізохрон. Її переваги порівняно з формулами чинних нормативних документів такі:

1. Формула (41) є загальною як для весняних водопіль, так само й для дощових паводків.
2. Вона поширюється на водозбори будь-яких розмірів – від окремих схилів і невеликих річок до розгалужених річкових систем.
3. Нова методична база відкриває перспективи для врахування місцевих факторів (зокрема, залісеності, заболоченості, закарстованості й озерності) шляхом включення їх складовими до тих чи інших

характеристик (шарів стоку, тривалості схилового припливу) на відповідних етапах формування максимального стоку.

4. У структурному рівнянні (41) використовуються розрахункові параметри, стосовно яких в Україні запропоновано надійні і теоретично обґрунтовані методичні підходи для їх визначення і нормування.

Таким чином, є всі підстави для того, щоб викладену розрахункову методику, як один з альтернативних варіантів, можна було розглядати як теоретичну базу для створення нового нормативного документа для визначення характеристик максимального стоку паводків і водопіль.

* *

В статье приводится анализ наиболее известных формул максимального стока, рассматриваются их отличия и недостатки, а также теоретически обосновываются научные и методические подходы к построению новой нормативной базы.

* *

1. Бефани А.Н. Основы теории ливневого стока // Тр. ОГМИ. – 1949. – Ч. 1. – Вып. 4. – С. 39-177.
2. Гопченко Е.Д. О редукции максимальных модулей дождевого стока по площади // Метеорология и гидрология. – 1975. - № 2. – С. 66-71.
3. Гопченко Е.Д., Бояринцев Е.Л. Упрощенная генетическая формула для расчета максимальных расходов весеннего половодья в бассейне Верхней Колымы // Тр. ДВНИГМИ. – 1980. – Вып. 34. – С. 3-11.
4. Гопченко Е.Д. О редукционных формулах максимального стока // Тр. УкрНИГМИ, 1980. – Вып. 175. – С. 85-93.
5. Гопченко Е.Д., Гушля А.В. Гидрология суши с основами мелиорации. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 303 с.
6. Гопченко Е.Д., Романчук М.Е. Нормирование характеристик максимального стока весеннего половодья на реках Причерноморской низменности. – К.: КНТ, 2005. – 148 с.
7. Гушля А.В. Влияние формы бассейна на величину максимальных расходов дождевых паводков // Метеорология, климатология и гидрология. – 1972. – Вып. 8. – С. 155-158.
8. Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 447 с.

Одеський державний екологічний університет