

УДК 556.166(477.72)

DOI <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2025.2.53>

ОБГРУНТУВАННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ РОЗРАХУНКОВОЇ ФОРМУЛИ МАКСИМАЛЬНОГО СТОКУ ВЕСНЯНОГО ВОДОПІЛЛЯ ДЛЯ РІЧОК ХЕРСОНСЬКОЇ ОБЛАСТІ

Шаталова Ж. О. – старший викладач кафедри землеустрою, геодезії та кадастру

Херсонського державного аграрно-економічного університету

ORCID ID: 0000-0003-1218-7143

Серед характеристик гідрологічного режиму річок, максимальний стік весняного водопілля, займає особливе місце внаслідок того виняткового значення, яке він має при наукових і практичних дослідженнях, а також при проектуванні та експлуатації гідротехнічних споруд на річках.

Умови формування екстремальних значень максимального стоку, частота їх виникнення, багаторічні тенденції є одними із найголовніших гідрологічних практичних розрахунків. Якщо розрахунки прогнозування максимального стоку весняного водопілля річок недостатньо надійні (обґрунтовані), то вони можуть призвести як до матеріальних втрат, у результаті руйнування гідротехнічних споруд, так й до несподіваних катастрофічних наслідків для населених пунктів, що знаходяться нижче за течією. А іноді призводить навіть до людських жертв.

Все це ставить перед проектувальниками вимоги високої відповідальності при призначенні розрахункових максимумів стоку. Але, з іншого боку, створення невиправдано великого запасу води призводить до завищення кошторисної вартості споруди, що знижує його рентабельність. По суті, при розрахунку максимального стоку, доводиться мати справу з необхідністю вирішення одночасно двох протилежних умов: безпеки споруди за період її експлуатації та економічної ефективності.

Не зважаючи на те, що характеристики максимального стоку весняного водопілля річок мають широке використання, їх визначення в умовах, які обмежені вихідними даними, належать до недостатньо вивчених в теоретичному і практичному відношеннях.

У сучасних нормативних документах, що діють в Україні, використовується багаторічний досвід теоретичних і практичних гідрологічних розрахунків, які накопичені науково-дослідними інститутами й проектними водогосподарськими установами.

Ключові слова: максимальний стік, весняне водопілля, розрахункові характеристики.

Shatalova Zh. O. Justification of the main parameters of the calculation formula for the maximum spring flood discharge for the rivers of the Kherson region

Among the characteristics of the hydrological regime of rivers, the maximum spring flood discharge occupies a special place due to the exceptional importance it has in scientific and practical research, as well as in the design and operation of hydraulic structures on rivers.

The conditions for the formation of extreme values of maximum runoff, their frequency of occurrence, and long-term trends are among the most important hydrological practical calculations. If the calculations for predicting the maximum runoff of spring floodwaters of rivers are not sufficiently reliable (substantiated), they can lead to both material losses as a result of the destruction of hydraulic structures and unexpected catastrophic consequences for settlements located downstream. And sometimes even lead to human casualties.

All this places high responsibility on designers when setting the design maximum flow. But, on the other hand, creating an unreasonably large water reserve leads to an overestimation of the estimated cost of the structure, which lowers its profitability. In fact, when calculating the maximum flow, one has to deal with the need to simultaneously solve two opposing conditions: the safety of the structure during its operation and economic efficiency.

Despite the fact that the characteristics of the maximum flow of spring floodplain rivers are widely used, their determination in conditions limited by initial data is insufficiently studied in theoretical and practical terms.

Modern regulatory documents in force in Ukraine use many years of experience in theoretical and practical hydrological calculations accumulated by research institutes and water management design institutions.

Key words: *maximum flow, spring floods, calculated characteristics.*

Постановка проблеми. У сучасному світі люди, не зважаючи на відкритий доступ до сучасних технологій, так і не навчилися приборкувати водну стихію.

Максимальний стік річок та наслідки його проходження для густозаселених прилеглих територій, є фактором потенційної небезпеки для людини в усі часи. На сьогодні, у світі розвинених сучасних технологій, проблема мінімізації негативних наслідків від повеней залишається актуальною.

Для рівнинної частини України, де протікають річки по території Херсонської області, характерним є проходження весняного водопілля внаслідок танення снігу та опадів за цей період. Іноді водопілля може набувати катастрофічного характеру, як, наприклад у 1931, 1932 та 1970 роках.

В сучасних умовах, у період кліматичних змін різного масштабу, за більшістю прогнозних сценаріїв, які розроблено світовими експертами, зростає ймовірність настання екстремальних природних явищ. До них відносять також й весняні водопілля, які мають рідкісну ймовірність перевищення.

Багато досліджень, як вітчизняних, так і зарубіжних вчених, присвячено вивченню умов формування максимального стоку річок та розробці розрахункових схем та моделей для його визначення. Але до повного вирішення цієї проблеми ще далеко, якщо взяти до уваги різноманітність умов формування стоку річок у різних фізико-географічних зонах та достатню кількість факторів, які впливають на величину і характер стоку в період весняного водопілля.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженнями максимального стоку річок в різні часи займалися відомі вчені-гідрологи такі, як А. В. Огієвський, Г. О. Алексєєв, К. П. Воскресенський, Д. Л. Соколовський, А. М. Бефані, а також П. Ф. Вишневський [1], В. І. Мокляк [2], Є. Д. Гопченко [3–6] та інші.

Фундаментальні праці професора А. М. Бефані, були присвячені теорії розрахунків максимального стоку річок. Надалі в роботах його учнів, теорія максимального стоку, яку він розробив, набула розвитку не тільки для паводків, а й для весняних водопілля. Окремі напрями досліджень, в подальшому, було розвинуто в роботах В. А. Овчарук [3–6].

Останніми роками досліджуючи максимальний стік річок, велику увагу приділяють впливу кліматичних змін на водний режим річок.

Мета дослідження – обґрунтувати основні параметри розрахункової формули максимального стоку весняного водопілля для річок Херсонської області.

Виклад основного матеріалу. Річки Херсонщини розташовані на Причорноморській низовині, яка має переважаючий ухил до Чорного моря. Південна її частина затоплена. Процес затоплення відбувається й по теперішній час. З одного боку, це спричинено опусканням земної поверхні, з іншого – підвищенням рівня моря.

Надалі пропонуємо розглянути обґрунтування розрахованих та узагальнених по території основних параметрів розрахункової методики максимального стоку весняного водопілля для річок Херсонської області.

Час руслового добігання

Час руслового добігання паводкової хвилі по довжині головного водотоку обчислюється за виразом:

$$t_p = \frac{L}{V_o}, \text{ год.} \quad (1)$$

де L – гідрографічна довжина водотоку, км;

V_o – швидкість добігання км/год.

Більшістю авторами, для розрахунку V_o , було запропоновано використовувати формулу:

$$V_d = a_1 Q^\alpha I^\beta, \quad (2)$$

де a_1 – коефіцієнт, що враховує форму перетину і шорсткість русла, називаний швидкісним; α і β – гідравлічні показники.

А. Н. Бефані одержав наступні вирази для a і b :

$$\alpha = \frac{r}{r+1}, \quad (3)$$

$$\beta = \frac{1}{2(r+1)}, \quad (4)$$

де $r = r_0 z$, а z залежить від типу русла ($z = 0.75$ – для природних русел, чистих і зарослих травною; 0.83 – для значно зарослих чагарником, водоростями; 1.0 – для селевих потоків, глибоких заплав). Степеневий показник r_0 для лісостепової зони України коливається в межах від 0.47 до 1.20 при середньому значенні $\bar{r}_0 = 0.66$, для степової зони – від 0.30 до 0.87 , при середньому значенні $\bar{r}_0 = 0.64$.

Степеневі показники a і b однакові для всіх зон: $\alpha = 0.33$; $\beta = 0.33$ (при $z = 0.75$ – природні русла, чисті і зарослі травною).

Таким чином, формула (2) може бути записана у вигляді:

$$V = a_1 Q^{0.33} I^{0.33}. \quad (5)$$

Для обґрунтування швидкісного коефіцієнта a_1 необхідно проаналізувати дані по середніх швидкостях течії усіх гідрометричних створів річок.

Якщо виразити Q через площу водозбору формулу швидкості руслового добігання можна записати в розрахунковому варіанті:

$$V_o = a_2 F^{\alpha_2} I^{0.33}, \text{ км/год,} \quad (6)$$

де a_2 – швидкісний параметр, який для степової зони, по якій протікають річки Херсонської області становить $1,19$.

Таким чином, для річок Херсонської області, формула для розрахунку швидкості добігання, буде мати наступний вигляд:

$$V_o = 1,19 F^{0.14} I^{0.33}, \text{ км/год.} \quad (7)$$

Розрахункові характеристики графіків припливу води зі схилів до руслової мережі

1. Обґрунтування коефіцієнтів нерівномірності припливу води зі схилів до руслової мережі

Коефіцієнт нерівномірності припливу води зі схилів до руслової мережі являє собою відношення максимальної витрати Q'_m до його середньої величини за період водопілля чи паводку $\bar{Q}_n$, тобто

$$\frac{n+1}{n} = \frac{Q'_m}{Q_{T_0}}. \quad (8)$$

Внаслідок рідкісної мережі воднобалансових станцій в організаційній структурі гідрометеорологічних спостережень, методичні підходи щодо обґрунтування $\frac{n+1}{n}$ вкрай обмежені. Тому заслуговує уваги запропонований у роботі метод визначення n через елементи руслового гідрографу, зокрема, через коефіцієнт нерівномірності руслового стоку $(m_1 + 1)/m_1$, який дорівнює

$$\frac{m_1 + 1}{m_1} = \frac{Q_m}{Q_{T_n}} = \frac{Q_m T_n}{Y_m F}, \quad (9)$$

де Q_m – максимальна витрата води;

T_n – підстава руслового гідрографу;

Y_m – максимальний шар стоку за водопілля чи паводок;

F – площа водозбору.

Узагальнення $(m_1 + 1)/m_1$ по території показало, що воно інтегрально може бути відображене за допомогою площі водозбору F . З ростом F під впливом ефектів русло-заплавного регулювання і часу руслового добігання відбувається спадання відношення Q_m/Y_m , з одного боку, і збільшення підстави гідрографів T_n – з іншого.

У цілому ж $Q_m T_n / Y_m F$ характеризується поступовим зменшенням його з ростом розмірів водозбірної площі.

Однак, існують деякі труднощі у встановленні параметра $(n + 1)/n$. У ряді робіт рекомендується обчислювати $(m_1 + 1)/m_1$ через середні багаторічні максимальні характеристики: $\bar{Q}_m, \bar{Y}_m, \bar{T}_n$, тобто

$$\frac{m_1 + 1}{m_1} = \frac{\bar{Q}_m \bar{T}_n}{\bar{Y}_m F}. \quad (10)$$

Обчислені за формулою (10) коефіцієнти $(m_1 + 1)/m_1$ для річок Херсонської області узагальнені у вигляді залежності $(m_1 + 1)/m_1 = f(F)$ (рис. 1). Як видно з рис. 1, отримана залежність дозволяє досить просто екстраполювати її на вісь

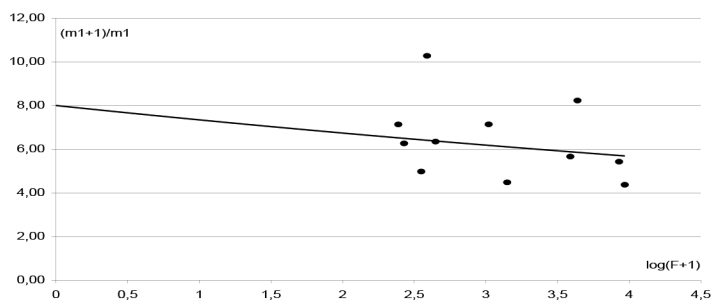


Рис. 1. Залежність коефіцієнту нерівномірності руслового притоку від площі водозбору для річок Херсонської області

ординат з метою встановлення $(n+1)/n$, як значення $\left(\frac{m_1+1}{m_1}\right)_{F \rightarrow 0} = \frac{n+1}{n}$. Для річок

Херсонської області можна прийняти $(n+1)/n = 8.0$, звідки $n = 0.14$.

2. Тривалість припливу води зі схилів до руслової мережі

Тривалість припливу води зі схилів до руслової мережі є однією з основних характеристик паводків і водопілля. У двооператорній схемі трансформації водоутворення у русловий гідрограф тривалість схилового припливу T_0 , при інших рівних умовах, визначає передусім міру зарегулювання стоку на схилах:

а) при $t_p < T_0$

$$T_0 = \left(\frac{k_F y_m}{n q_m} \right)^{\frac{1}{n+1}} \left[(n+1) T_0^n - \frac{m+1}{n+m+1} t_p^n \right]^{\frac{1}{n+1}}; \quad (11)$$

б) при $t_p > T_0$

$$T_0 = \left[\left(\frac{m+n+1}{n+1} - \frac{q_m}{y_m k_F} t_p \right) \frac{m(n+m+1)}{n+1} t_p^m \right]^{\frac{1}{m}}. \quad (12)$$

При масових розрахунках нульове наближення потрібно починати зверху з деякого числа, що явно перевищує фізичні межі T_0 , але не менше t_p , наприклад, 2000 годин. Якщо на якомусь кроці ітераційної процедури послідовність T_{0i} розходиться, тривалість притоку обчислюється алгебраїчним шляхом за рівнянням (12).

Для річок Херсонської області значення T_0 розраховані з використанням програми « T_0 », яка була розроблена на кафедрі гідрології ОДЕКУ.

Результати розрахунку приведені в табл. 2. Наступним етапом розрахунку є узагальнення параметра T_0 по території. На рівнинних територіях характеристики весняної повені багато в чому пов'язані з географічним положенням об'єктів. Тому, щоб вивчити питання впливу на тривалість припливу T_0 комплексу місцевих чинників (залісеності, заболоченості, закарстованості), необхідно спочатку дослідити закономірності, пов'язані з внеском географічної складової. Для цього достатньо побудувати графік зв'язку $T_0 = f(\varphi^\circ)$, де φ° – широта геометричних центрів ваги водозборів (рис. 2). Як видно з цього рисунка, залежність присутня, але має доволі низький коефіцієнт кореляції. Для врахування впливу місцевих

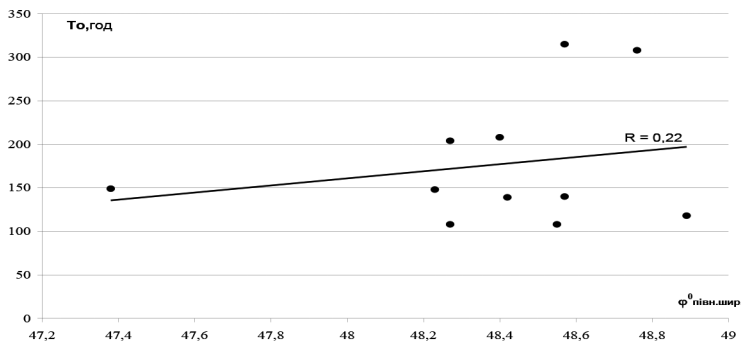


Рис. 2. Залежність тривалості припливу від широти центрів тяжіння водозборів

чинників на тривалість припливу від залісеності та від заболоченості (залежності не будуються, так як залісеність та заболоченість дуже мала (< 1)), тому робимо висновок, що ліс та болота не впливають на тривалість припливу весняного водопілля на розглянутій території.

Як видно з рис. 3, значення T_0 має доволі складний характер та в цілому можна відмітити зменшення припливу від 300 годин на північному заході до 100 годин на півдні.

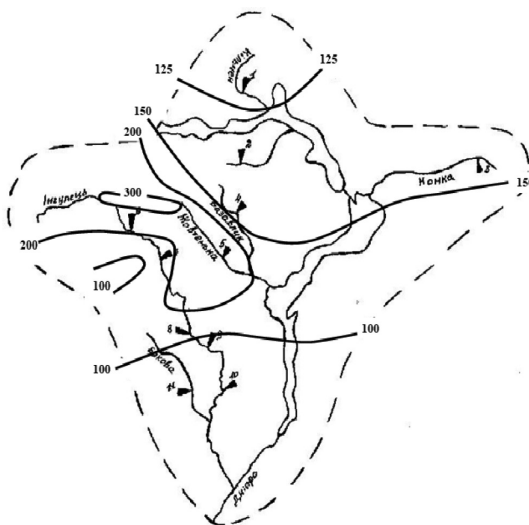


Рис. 3. Карта-схема розподілу тривалості припливу води зі схилів в період весняного водопілля для річок Херсонської області

3. Трансформаційна функція

Одним з видів трансформації є розпластування хвилі під впливом часу руслового добігання t_p . Кількісно міра трансформації максимальних модулів під впливом часу руслового добігання визначається за допомогою функції $\psi(t_p/T_0)$ по рівняннях (14) і (15):

а) при $t_p < T_0$

$$\psi(t_p/T_0) = 1 - \frac{m+1}{(m+n+1)(n+1)} \left(\frac{t_p}{T_0} \right)^n; \quad (14)$$

б) при $t_p \geq T_0$

$$\psi(t_p/T_0) = \frac{n}{n+1} \frac{T_0}{t_p} \left[\frac{m+1}{m} - \frac{n+1}{m(m+n+1)} \left(\frac{T_0}{t_p} \right)^m \right]. \quad (15)$$

Коефіцієнти нерівномірності схилового припливу визначалися через коефіцієнти нерівномірності руслового стоку.

Загалом для річок Херсонської області коефіцієнт нерівномірності припливу води зі схилів до руслової мережі $(n+1)/n$ в період водопілля дорівнює 8.0, а $n = 0.14$. З урахуванням цих даних і, приймаючи $m = 1.0$, запишемо рівняння для трансформаційної функції $\psi(t_p/T_0)$ в редакції:

а) при $t_p < T_o$

$$\psi(t_p/T_o) = 1 - 0,87 \left(\frac{t_p}{T_o} \right)^{0,14}, \quad (16)$$

б) при $t_p \geq T_o$

$$\psi(t_p/T_o) = 0,83 \frac{T_o}{t_p} \left(2,0 - 0,52 \frac{T_o}{t_p} \right). \quad (17)$$

По вихідних матеріалах за формулами (16) і (17) розраховані значення трансформційної функції.

4. Максимальний модуль схилового припливу

Однією з головних складових розрахункової формули є максимальний модуль силового припливу q'_m . Визначити його можна за наявності значень коефіцієнта нерівномірності силового припливу $\frac{n}{n+1}$, тривалості силового припливу T_o , і шарів стоку за формулою

$$q'_m = 0,28 \frac{n+1}{n} \frac{1}{T_o} Y_m. \quad (18)$$

Для розглянутої території були розраховані значення q'_m . Але для подальших розрахунків необхідно також знати співвідношення, q_m/q'_m , що характеризує загальну редукцію максимального модуля стоку зі зростанням площі водозбору. Таким чином після обчислення q'_m будується залежність $\lg(q/q'_m) = f(\lg(F+1))$ рис. 4. Як бачимо з малюнка проведення лінії зв'язку спрощується тим що залежність проходить через $\lg(q/q'_m) = 0$ при $\lg F = 0$. В загальному випадку:

$$\frac{q_m}{q'_m} = \frac{1}{(F+1)^n}. \quad (19)$$

Для річок Херсонської області $n_1 = 0,27$, надалі це значення буде використовуватись при розрахунках коефіцієнту русло-заплавного регулювання та водообміну ε_F .

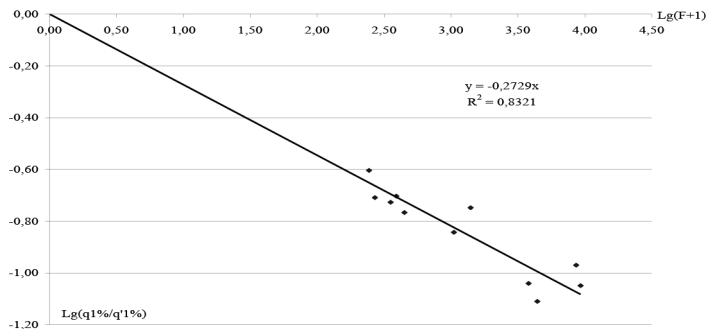


Рис. 4. Залежність співвідношення q_m/q'_m від площі водозборів

5. Коефіцієнт русло-заплавного регулювання

Вплив русло-заплавного регулювання на максимальний стік визначається за допомогою коефіцієнта, який являє собою функцію E_F спадаючого вигляду

(з верхнім граничним значенням $E_F = 1.0$, при $F \rightarrow 0$) із зростанням водозбірної площі. Розрахувати її можна за формулою:

$$\varepsilon_F = \frac{q_m/q'_m}{\psi(t_p/T_o)}. \quad (20)$$

Редукція максимального модуля q_m/q'_m може бути описана рівнянням

$$q_m/q'_m = \frac{1}{(F+1)^{n_1}}. \quad (21)$$

З урахуванням рівняння (21) розраховані значення E_F . Узагальнення параметра E_F по території виконане в залежності від площі водозбору (рис. 5). Залежність $\varepsilon_F = f(F)$, як видно з рис. 4, виражена добре. Виходить вона з 0 при $\lg(F) \rightarrow 0$ і має в області малих площ (до 100 км²) спадаючий характер, який надалі змінюється більш пологим спадом кривої редукції.

Для невивчених річок території, що розглядається, для визначення коефіцієнта E_F рекомендується користуватися залежністю $E_F = f(F)$ (рис. 5).

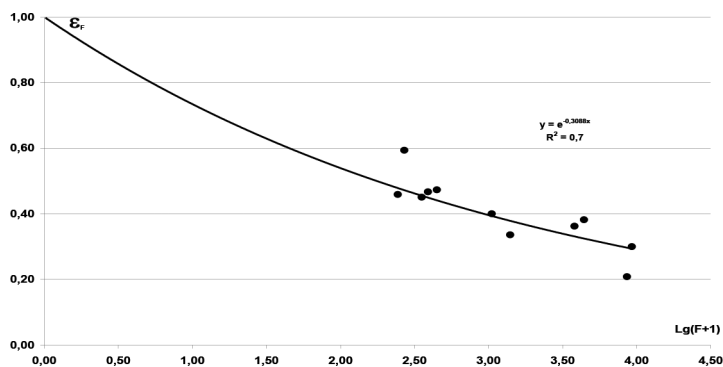


Рис. 5. Залежність коефіцієнту русло-заплавного водообміну та регулювання від площі водозборів

Отже, розрахункова формула для максимального стоку весняного водопілля для річок Херсонської області має вигляд:

$$q_{p\%} = q'_{1\%} \psi(t_p/T_o) E_F \lambda_p, \text{ м}^3/\text{с} \cdot \text{км}^2. \quad (22)$$

Для того, щоб підрахувати q_p необхідно мати такий мінімум вихідних даних: площу водозбору F (км²), довжину річки L (км), середньозважений ухил $I(0/00)$.

Середнє відхилення розрахункових значень від фактичних для річок Херсонської області відповідно дорівнює $\pm 8,4\%$, що при точності вихідної інформації $\pm 17,5\%$ є добрим результатом

Висновки. У гідрологічному відношенні річки Херсонської області вивчені не достатньо добре, так як на даний час залишилося тільки 11 діючих гідрологічних станцій і постів. У статті використані дані всіх 11 постів з площею водозборів від 243 км² (р. Жовтенька – с. Олексіївка) до 9280 км² (р. Інгулець – с. Могиловка) та тривалістю спостережень від 32 років (р. Бокова – с. Валове (Софієво-Гейковка)) до 50 років (р. Інгулець – м. Кривий Ріг та р. Інгулець – с. Могиловка).

В розрахунках використані сучасні дані, отже вихідна інформація суттєво уточнена у порівнянні зі СНІП 2.01.14.–83, де використані дані до 1976 року.

Операторна модель, яка використана для нормування характеристик максимального стоку весняного водопілля, дозволяє враховувати всі стокоформуючі фактори і може бути використана для водозборів будь – яких розмірів.

Точність розрахунку за запропонованою методикою знаходиться на рівні точності вихідної інформації і складає $\pm 8,4 \%$, що при точності початкової інформації $\pm 17,5 \%$, є добрим результатом. Отже, запропонована методика може бути рекомендована як регіональна для річок Херсонської області.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Вишневський П. Ф. Зливи і зливовий стік на Україні. Київ : Наукова думка, 1964. 290 с.
2. Мокляк В. І. Максимальні витрати від талих вод на річках УРСР. Київ : 1957. 163 с.
3. Гопченко Є. Д., Овчарук В. А., Шакірзанова Ж. Р. Розрахунки та довгострокові прогнози характеристик максимального стоку весняного водопілля в басейні р. Прип'ять: Монографія. Одеса : Екологія, 2011. 336 с.
4. Гопченко Є. Д. Гідрологічні розрахунки [текст]: підручник для студентів ВНЗ / Гопченко Є. Д., Лобода Н. С., Овчарук В. А. Одеса : ТЕС, 2014. 483 с.
5. Гопченко Є. Д., Овчарук В. А., Романчук М. Є. Удосконалення розрахунково-нормативної бази для визначення характеристик максимального стоку дощових паводків і весняних водопіль / Вісник Одеського державного екологічного університету. 2017. Вип. 21. с. 49–55.
6. Овчарук В. А., Гопченко Є. Д. Сучасна методика нормування характеристик максимального стоку весняного водопілля рівнинних річок України / Український географічний журнал. 2018. No 2(102). С. 26–33.

REFERENCES:

1. Vyshnevskiy P. F. (1964). *Storm and storm drain in Ukraine*. Kyiv. [In Ukrainian].
2. Mokliak V. I. (1957). *Maximum discharges from snowmelt on the rivers of the Ukrainian SSR*. Kyiv. [In Ukrainian].
3. Hopchenko Ye. D., Ovcharuk V. A., Shakirzanova Zh. R. (2011). *Calculations and long-term forecasts of the characteristics of the maximum runoff of spring water in the Prip'yat river basin*. Odessa. [In Ukrainian].
4. Hopchenko Ye. D., Loboda N. S., Ovcharuk V. A. (2014). *Hydrological calculations: textbook for university students*. Odessa. [In Ukrainian].
5. Hopchenko Ye. D., Ovcharuk V. A., Romanchuk M. Ye. (2017). Improvement of the calculation and normative base for determining the characteristics of the maximum runoff of rain and spring floods. *Bulletin of the Odessa State Ecological University*. Vol. 21, 49–55. [In Ukrainian].
6. Ovcharuk V. A., Hopchenko E. D. Modern methodology for normalizing the characteristics of the maximum spring floodplain runoff of lowland rivers of Ukraine / Ukrainian Geographical Journal. 2018. No. 2(102). pp. 26–33. [In Ukrainian].