

УДК 004.942

**Д.В. СТЕФАНИШИН**

**ОБҐРУНТУВАННЯ ЕКОНОМІЧНО ОПТИМАЛЬНОГО ЗНАЧЕННЯ  
РОЗРАХУНКОВОЇ ВИТРАТИ ВОДИ МАЛОЇ ЙМОВІРНОСТІ  
ПЕРЕВИЩЕННЯ НА ВОДОПРОПУСКНИХ СПОРУДАХ  
З ВРАХУВАННЯМ РИЗИКУ**

***Анотація.** Запропоновано аналітичний метод обґрунтування економічно оптимального значення розрахункової витрати води малої ймовірності перевищення на водопропускних спорудах з врахуванням ризику на основі даних гідрологічних спостережень. Задача вирішується на прикладі проекту водопропускних споруд малої гідроелектростанції на річці Стрий у Львівській області.*

***Ключові слова:** водопропускні споруди, закони розподілу ймовірності, збитки, ймовірність перевищення, приведена вартість, розрахункова витрата води, ризик збитків, узагальнені втрати.*

**Вступ**

Водопропускні споруди, що забезпечують організований пропуск води у складі гідровузлів різного призначення, відносяться до відповідальних гідротехнічних споруд, забезпеченню надійності яких приділяють значну увагу і на зведення яких витрачаються значні кошти. В деяких випадках їх вартість може сягати 50% і більше від загальної вартості гідротехнічних проектів. При цьому окрім збитків від пошкодження і руйнувань конструкцій власне водопропускних споруд, аварії і надзвичайні ситуації на них загрожують переповненням водосховищ, руйнуваннями гребель і дамб, будівель гідроелектростанцій, інших гідроспоруд у складі гідровузлів та об'єктів в нижніх та верхніх б'єфах [1].

Однією з основних причин аварій на водопропускних спорудах є перевищення максимальних витрат води паводків над розрахунковими витратами, на які споруди розраховуються при проектуванні [1]. При цьому часто водопропускні споруди, особливо катастрофічні водоскиди, водоспуски й водовипуски, можуть використовуватися за призначенням тільки в екстремальних випадках – при пропуску паводків малої ймовірності перевищення (від 5 до 0,01%). Тому обґрунтування розрахункових значень максимальних витрат води на водопропускних спорудах являє собою не лише складну і надзвичайно відповідальну інженерно-технічну задачу забезпечення надійності й безпеки гідротехнічних та гідроенергетичних об'єктів, а й складну та відповідальну інженерно-економічну задачу.

**1. Особливості гідрологічного прогнозування максимальних витрат води малої ймовірності перевищення**

В інженерній гідрології існує два принципові напрямки досліджень максимальних гідрологічних характеристик малої ймовірності перевищення

(забезпеченості), які умовно можна визначити як імовірнісний (або статистичний) та генетичний (детерміністичний) [2].

Генетичний напрямок виходить з очевидності й необхідності кількісного дослідження причинно-наслідкових зв'язків між гідрологічними характеристиками (витратами, об'ємами стоку тощо) та стокоутворюючими факторами, насамперед, з гідрометеорологічними, площею річкового басейну, особливостями його рельєфу, поширенням лісів, боліт тощо. Однак кількісну сторону цих зв'язків, через їх надзвичайну складність і взаємозалежність, на разі дуже важко виразити надійними генетичними рівняннями стоку. Тому генетичний напрямок все ще не знайшов значного практичного використання і здебільшого обмежується побудовою різного роду регіональних емпіричних формул.

В підґрунті імовірнісного підходу до прогнозування максимальних гідрологічних характеристик лежить використання методів математичної статистики та теорії ймовірностей для обробки даних спеціалізованих гідрометричних спостережень за максимальними характеристиками стоку, визначення на їх основі статистичних параметрів розподілів ймовірності, оцінка емпіричних ймовірностей та побудова аналітичних кривих забезпеченості (ймовірності перевищення) на основі законів розподілу ймовірності. Перевагою імовірнісного підходу є те, що в його рамках інтегровано оцінюється комплекс різноманітних факторів, що визначають максимальний стік й максимальні витрати води, зокрема, шляхом прямих замірів рівнів води та витрат з наступною статистичною обробкою гідрологічних часових рядів [2-4]. Оскільки гідрологічні явища і процеси в переважній більшості є багатofакторними, представляють результат дії великого числа випадкових факторів і зв'язків, вплив кожного з яких на формування явища максимального стоку адекватно врахувати в рамках генетичних (детерміністичних) моделей стоку практично неможливо, в практичних гідрологічних розрахунках максимального стоку імовірнісні методи користуються значною популярністю. Цей напрямок гідрологічних досліджень є характерним для більшості країн світу, де ведуться тривалі гідрометричні спостереження.

Основною математичною моделлю при імовірнісному прогнозуванні витрат води за даними гідрометричних спостережень є закон розподілу ймовірності випадкової величини. Для більшості річок, що не зазнали значного антропогенного навантаження та при наявності даних безперервних спостережень на достатніх інтервалах часу (не менше 30-40 років), це припущення певною мірою себе виправдовує [2-4]. Існує ряд аналітичних законів розподілу ймовірності, які в тій чи іншій мірі відповідають умовам моделювання максимальних гідрологічних характеристик за даними спостережень в рамках статистично-імовірнісного підходу і можуть застосовуватися для вирішення практичних задач прогнозування максимальних витрат води малої ймовірності перевищення. Зокрема, це трьохпараметричний гамма-розподіл С.Н. Крицького і М.Ф. Менкеля [4], який рекомендується вітчизняними нормами, закон Гумбеля типу I, закон Пірсона типу III, логарифмічно нормальний закон, які успішно використовуються при гідрологічному прогнозуванні за кордоном [3].

## 2. Загальна постановка задачі, вихідні дані та моделі

Аналітичні функції розподілу ймовірності, що використовуються для згладжування емпіричних функцій розподілу й прогнозування шляхом екстраполяції максимальних витрат води малої ймовірності перевищення, що ще не спостерігалися, підбирають так, щоб вони якнайкраще відповідали наявним даним спостережень і, звичайно, особливостям формування й перебігу явища максимального стоку на ріці, що досліджується. При цьому, різні аналітичні закони розподілу ймовірності, що використовуються при моделюванні й прогнозуванні максимальних гідрологічних явищ, можуть давати досить близькі результати на інтервалах, що відповідають тривалості спостережень й емпіричним частотам, тоді як екстраполяція в область значень максимальних витрат води, що не спостерігалися, але є предметом прогнозування, веде до наростання розбіжностей між результатами, що відповідають різним аналітичним законам розподілу.

Приклад такої розбіжності, яка породжує невизначеність прогнозування максимальних витрат води малої ймовірності перевищення за допомогою різних законів розподілу ймовірності, показано на рис. 1 та в табл. 1, де наведено результати прогнозування розрахункової витрати води 1% ймовірності перевищення для обґрунтування розмірів водопропускних споруд малої гідроелектростанції на р. Стрий, що проектувалась у Львівській області. При моделюванні використовувався гідрологічний ряд максимальних витрат р. Стрий, заміряних на гідрометричному посту Верхнє Синьовидне з 1951 р. по 1998 р.

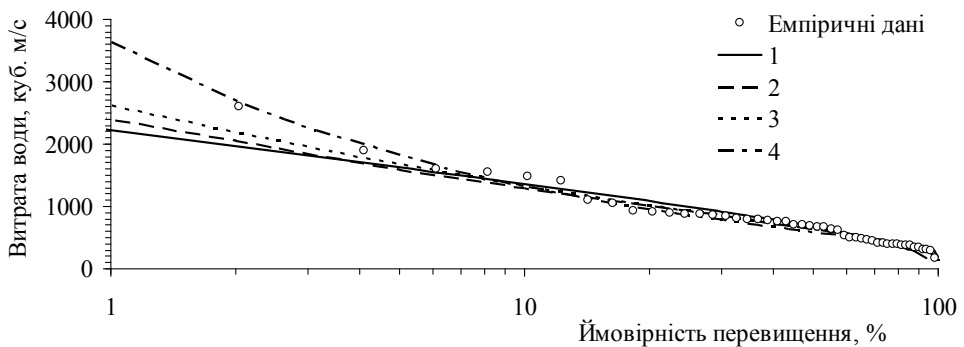


Рисунок 1 – Криві ймовірності перевищення максимальних витрат води р. Стрий, побудовані за даними спостережень на гідрометричному посту Верхнє Синьовидне

Пояснення до рис. 1:

- 1 – закон Гумбеля типу I (арифметичний);
- 2 – трьохпараметричний закон Крицького-Менкеля при  $C_V = 0,6$ ,  $C_S = 4C_V$ ;
- 3 – закон Пірсона типу III (логарифмічний, десяткові логарифми);
- 4 – закон Гумбеля типу I (логарифмічний, натуральні логарифми).

Таблиця 1 – Результати прогнозування розрахункової витрати води 1% ймовірності перевищення р. Стрий на гідрометричному посту Верхнє Синьовидне

№ з/п	Закон розподілу ймовірності	Максимальна витрата води, м <sup>3</sup> /с
1	Гумбеля типу I (арифметичний)	2219
2	Крицького-Менкеля при $C_V = 0,6$ ; $C_S = 4C_V$	2395
3	Пірсона типу III (десяткові логарифми)	2621
4	Гумбеля типу I (натуральні логарифми)	3633

Основні статистичні характеристики гідрологічного ряду – середнє  $E$ , стандарт  $S$ , коефіцієнт варіації  $C_V$ , коефіцієнт асиметрії  $C_S$ , отримані за формулами математичної статистики, відповідно склали:  $E = 755,4$  м<sup>3</sup>/с,  $S = 466,5$  м<sup>3</sup>/с,  $C_V = 0,62$ ,  $C_S = 1,89$ . Емпіричні ймовірності перевищення ( $\hat{P}$ , %) встановлювалися за формулою Вейбула [3]:

$$\hat{P} = 100 \frac{m}{n+1}, \quad (1)$$

де  $m$  – порядковий номер члена, упорядкованого у порядку спадання варіаційного ряду;  $n$  – загальна кількість членів ряду максимальних витрат води.

Оскільки, за однієї й тієї ж заданої (нормативної) ймовірності перевищення, розрахункові значення максимальної витрати води можуть бути різними – меншими або більшими в залежності від вибраного закону розподілу, то, відповідно, будуть зменшуватися або збільшуватися розміри водопропускних споруд та їх приведена вартість  $C$ , яка як функція витрат води добре апроксимується залежностями виду [5]:

$$C = k \cdot Q^b, \quad (2)$$

де  $k$  – вартісна константа, яка характеризує тип водопропускної гідроспоруди, її конструкцію, матеріали, технологію будівництва, правила експлуатації, технічне обслуговування тощо;  $b$  – параметр, який може трактуватися як еластичність затрат ( $b = 0 \div 1$ ):

$$b = \frac{Q}{C} \frac{dC}{dQ}. \quad (3)$$

При цьому при перевитраті коштів на будівництво та експлуатацію водопропускних споруд при виборі більшого значення розрахункової витрати води заданої ймовірності перевищення й збільшенні їх пропускної здатності можна очікувати зменшення ймовірності можливих аварій і надзвичайних ситуацій і ризику збитків від них на гідроспорудах, і навпаки, при економії

коштів і проектуванні водопропускних споруд на меншу пропускну здатність з вибором меншого значення розрахункової витрати води заданої ймовірності перевищення слід очікувати збільшення ймовірності можливих аварій і надзвичайних ситуацій та ризику збитків від них.

### 3. Врахування ризику при обґрунтуванні економічно оптимального значення розрахункової витрати води

Чинні норми в більшості країн світу, зокрема і в Україні [6], при обґрунтуванні розрахункових значень максимальних витрат води при проектуванні водопропускних споруд враховують ризик опосередковано – шляхом регламентації ймовірностей перевищення відповідних гідрологічних характеристик в залежності від класу споруд за відповідальністю та наслідками аварій та надзвичайних ситуацій (табл. 2).

Таблиця 2 – Допустимі щорічні ймовірності перевищення розрахункових максимальних витрат води згідно з чинними вітчизняними нормами [6]

Розрахункові випадки	Щорічна допустима ймовірність перевищення $p$ , %, розрахункових максимальних витрат води для класів гідроспоруд			
	СС3	СС2-1	СС2-2	СС-1
Основний	0,1	1,0	3,0	5,0
Перевірний	0,01*	0,1	0,5	1,0

\* З врахуванням гарантійної поправки

Оскільки розрахункове значення максимальної витрати води заданої ймовірності перевищення може залежати від вибору аналітичного закону розподілу ймовірності (див. рис. 1), прийнятого в якості екстраполяційної моделі, то носій рішення, орієнтуючись на різні аналітичні закони розподілу, в залежності від результатів перевірки статистичних гіпотез чи мотивуючи своє рішення будь-якими іншими причинами, може занижувати чи завищувати розрахункове значення максимальної витрати при одній і тій же, регламентованій нормами, ймовірності перевищення (див. табл. 1).

При цьому може змінюватися вартість споруд і ризик збитків від можливої аварії або надзвичайної ситуації на водопропускних спорудах.

З врахуванням того, що збитки від гідродинамічних аварій на гідроспорудах визначаються переважно параметрами хвиль прориву (піковими витратами хвилі прориву в створах, часом добігання хвилі прориву, тривалістю затоплення тощо), які в свою чергу можуть залежати від типу гідроспоруди, що руйнується, об'єму водосховища, морфологічних характеристик долини ріки, залежність додаткових до втраченої вартості гідроспоруд збитків від прийнятого в проекті розрахункового значення максимальної витрати води заданої ймовірності перевищення (за умови необхідної корекції збитків, що мають безпосереднє відношення до аварії споруди або до проявів природного максимального стоку) можна замінити залежністю від параметрів хвилі прориву.

Тоді з вибором кожного з  $i$ -х альтернативних законів розподілу та відповідних їм альтернативних  $i$ -х розрахункових значень витрат води можна

пов'язати узагальнені щорічні втрати  $L_i$ , що визначаються сумами приведених вартостей  $C_i$  та ризиків збитків  $R_i$  відповідних проектних варіантів водопропускних споруд:

$$L_i = C_i + R_i, \quad i = \overline{1, n} . \quad (4)$$

Упорядкуємо модельні закони розподілу ймовірності або відповідні їм розрахункові значення витрат води заданої ймовірності перевищення  $p$  (далі – альтернативи) таким чином, щоб встановлені максимальні витрати води  $Q_{p, \max, i}$ ,  $i = \overline{1, n}$ , задовольняли умові:

$$Q_{p, \max, 1} < \dots < Q_{p, \max, i} > \dots < Q_{p, \max, n} , \quad (5)$$

де  $n$  – загальна кількість альтернатив.

Легко показати, що з метою порівняння альтернатив за вартістю водопропускних споруд в якості базової зручно приймати найдешевший з проектних варіантів, а з метою їх порівняння за ризиком збитків – найдорожчий з проектних варіантів.

Тоді узагальнені додаткові втрати у випадку прийняття  $i$ -ої альтернативи будуть:

$$\Delta L_i = \Delta C_i + \Delta R_i , \quad (6)$$

де  $\Delta C_n = C_n - C_i$ ;  $\Delta R_i = (p_{i,n} - p)D_A$ ;  $C_n$ ,  $C_i$  – приведені вартості  $n$ -го та  $i$ -го проектних варіантів водопропускних споруд;  $p_{i,n}$  – ймовірність перевищення витрати  $Q_{p, \max, i}$ , визначена на  $n$ -й альтернативі (тобто за допомогою  $n$ -го закону розподілу ймовірності) (див. приклад на рис. 2);  $p$  – задана ймовірність перевищення, прийнята в проєкті;  $D_A$  – очікувані збитки внаслідок аварії.

Відповідно для першої альтернативи узагальнені додаткові втрати  $\Delta L_1$  визначаються лише величиною додаткового ризику збитків, а узагальнені додаткові втрати  $\Delta L_n$  останньої  $n$ -ї альтернативи величиною додаткових затрат:  $\Delta L_1 = (p_{1,n} - p)D_A$ ;  $\Delta L_n = C_n - C_1$ .

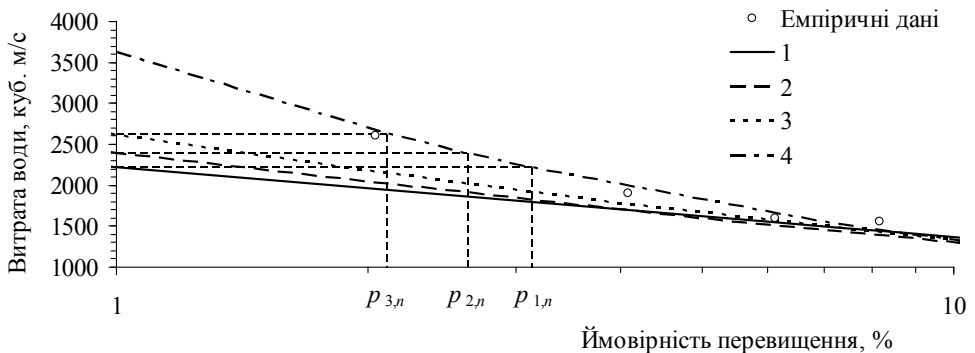


Рисунок 2 – Схема для визначення ймовірностей перевищення  $p_{i,n}$

Задача вибору економічно оптимального значення розрахункової витрати води малої ймовірності перевищення при цьому зводиться до задачі мінімізації цільової функції  $\Delta L_i$ , що визначає узагальнені додаткові втрати (6):

$$\Delta L_i \rightarrow \min_{Q_{p, \max, i}}, i = \overline{1, n}. \quad (7)$$

#### 4. Приклад обґрунтування економічно оптимального значення розрахункової витрати води

В якості прикладу розглядалася задача вибору економічно оптимального значення розрахункової витрати води на водопропускній споруді малої гідроелектростанції, що проектувалась на р. Стрий у Львівській області. Результати прогнозування розрахункових витрат води заданої ймовірності перевищення ( $p = 1\%$ ) за допомогою чотирьох законів розподілу ймовірності наведено на рис. 1 та в табл. 1 (гідрометричний пост Верхнє Синьовидне). Основні техніко-економічні показники варіантів водопропускної споруди, в залежності від розрахункової витрати води, наведено в табл. 3.

Таблиця 3 – Техніко-економічні параметри варіантів водопропускної споруди

Варіант споруди	Витрата води, м <sup>3</sup> /с	Напір, м	Ширина водопропускного фронту, м	Вартість споруди, євро
1	2219	3,59	150	191887,5
2	2395	3,59	162	207238,5
3	2621	3,59	178	227706,5
4	3633	3,59	246	314695,5

Сукупні збитки від можливих аварій і надзвичайних ситуацій на водоскидній споруді приймалися рівними  $D_A = 5$  млн. євро. Результати розрахунку узагальнених додаткових втрат для порівняння варіантів споруди наведено в табл. 4.

Таблиця 4 – Результати розрахунку узагальнених додаткових втрат для порівняння варіантів водопропускної споруди ( $p = 1\%$ ,  $D_A = 5$  млн. євро)

Варіант споруди	Витрата води, м <sup>3</sup> /с	$p_{i,n}$ , %	$p_{i,n}$	$\Delta C_n$ , євро	$\Delta R_i$ , євро	$\Delta L_i$ , євро
1	2219	3,127	0,03127	0	106338	106338
2	2395	2,626	0,02626	15351	81292	96643
3	2621	2,1	0,021	35819	55000	90819
4	3633	1	0,01	122808	0	122808

Результати розв'язання задачі оптимізації та вибору економічно оптимального значення розрахункової витрати води показано на рис. 3.

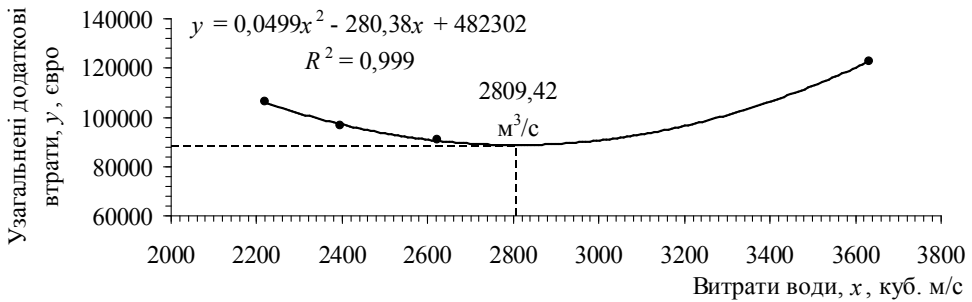


Рисунок 3 – Вибір економічно оптимального значення розрахункової витрати води

Встановлено, що в заданих умовах економічно оптимальне значення розрахункової витрати води складає 2809,42 м<sup>3</sup>/с і може прийматися рівним 2810 м<sup>3</sup>/с.

### Висновки

1. Обґрунтування розрахункових значень максимальних витрат води на водопропускних спорудах є складною інженерно-економічною задачею, обтяженою невизначеністю гідрологічного прогнозування та ризиком.
2. Задача вибору економічно оптимального значення розрахункової витрати води заданої ймовірності перевищення з врахуванням ризику може розв'язуватися як задача мінімізації додаткових узагальнених втрат у вигляді сум додаткових вартостей та ризиків збитків.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Векслер А.Б. Надежность, социальная и экологическая безопасность гидротехнических объектов: оценка риска и принятие решений / А.Б. Векслер, Д.А. Ивашинцов, Д.В. Стефанишин. – СПб.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2002. – 591 с.
2. Картвелишвили Н.А. Теория вероятностных процессов в гидрологии и регулирование речного стока / Н.А. Картвелишвили. – Л.: Гидрометеоиздат, 1985. – 191 с.
3. Виссмен У. мл. Введение в гидрологию / У. Виссмен мл. и др. – Л.: Гидрометеоиздат, 1979. – 470 с.
4. Крицкий С.Н. Гидрологические основы управления речным стоком / С.Н. Крицкий, М.Ф. Менкель. – М.: Наука, 1981. – 255 с.
5. Лаукс Д. Планирование и анализ водохозяйственных систем / Д. Лаукс, Дж. Стединжер, Д. Хейт // Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 316 с.
6. ДБН В.2.4-3:2010. Гідротехнічні, енергетичні та меліоративні системи і споруди, підземні гірничі виробки. Гідротехнічні споруди. Основні положення / ДБН В.2.4-3:2010. – К.: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2010. – 37 с.

*Стаття надійшла до редакції 17.04.2015*