

УДК 626/627 ; 504.05

С.В. АТАЄВ, Д.В. СТЕФАНИШИН

## ПРОГНОЗУВАННЯ ЗМІН ГІДРОЛОГО-МОРФОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РІЧОК ПРИ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНОМУ ОБГРУНТУВАННІ ПРОЕКТІВ ВІДНОВЛЕННЯ МАЛИХ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

*Анотація.* Розглянуто проблему прогнозування змін гідролого-морфологічних характеристик річок на прикладах проектів відновлення Чижівської, Більче-Золотецької та Велико-Сорочинської малих гідроелектростанцій. Обґрунтовано важливість обмеження напору як основного чинника змін гідролого-морфологічних характеристик рік та запропоновано методи їх прогнозування при техніко-економічному обґрунтуванні проектів.

*Ключові слова:* верхній і нижній б'єфи, відновлення малих гідроелектростанцій, гідролого-морфологічні характеристики, оцінка впливу на навколишнє середовище, прирічкові території, прогнозування, техніко-економічне обґрунтування.

**Актуальність проблеми.** Відновлення малих гідроелектростанцій (МГЕС) на перший погляд є нескладною інженерно-технічною задачею і в більшості випадків зводиться до капітального ремонту гідроспоруд й заміни гідроенергетичного та механічного обладнання. Однак різні варіанти відновлення, зокрема ті, що супроводжуються реконструкцією гідроспоруд, модернізацією та зміною режимів експлуатації МГЕС, можуть призводити до змін гідролого-морфологічних характеристик річок, що негативно впливають на екологію річок та прилеглих до них територій. Чинниками таких змін при відновленні МГЕС можуть бути встановлені при техніко-економічному обґрунтуванні (ТЕО) техніко-економічні показники МГЕС, зокрема такі показники, як розрахунковий напір, режими рівнів води в б'єфах, кількість та потужність гідроагрегатів, розрахункові турбінні витрати води тощо. Прогнозування змін гідролого-морфологічних характеристик річок актуально для здійснення об'єктивної оцінки впливу на навколишнє середовище (ОВНС) проектної діяльності, оцінки загального екологічного стану річки та прирічкових територій, оцінки впливу МГЕС на окремі елементи довкілля, на умови життєдіяльності місцевого населення, на народногосподарські об'єкти, на природні та інші об'єкти, що підлягають охороні і розміщуються в руслі ріки та на прирічкових територіях у верхньому і нижньому б'єфах.

**Об'єкт, предмет та мета досліджень.** Розрахунковий напір, режими рівнів води у б'єфах, турбінні витрати води є не лише важливими техніко-економічними показниками МГЕС, але і основними чинниками, що викликають зміни гідролого-морфологічних характеристик рік, які можуть негативно впливати на стан довкілля [1, 2]. Збільшення напору, корисного об'єму водосховища, турбінних витрат води в процесі відновлення МГЕС може

посилювати абразію берегів водосховища, річкову ерозію в нижньому б'єфі, змінювати розподіл зон акумуляції наносів різних фракцій у верхньому б'єфі, інтенсифікувати процеси трансформації русла ріки у нижньому б'єфі, сприяти підтопленню та заболочуванню нових ділянок прирічкових територій тощо, що, в результаті, погіршує стан довкілля та завдає шкоди місцевому населенню. Тому рішення щодо призначення основних техніко-економічних показників МГЕС при складанні ТЕО проектів їх відновлення слід обґрунтувати відповідними оцінками та прогнозами змін гідролого-морфологічних характеристик річок.

*Об'єктом досліджень* у статті є зміни гідролого-морфологічних характеристик річок при відновленні об'єктів малої гідроенергетики.

*Предметом досліджень* є прогнозування змін гідролого-морфологічних характеристик річок в залежності від варіантів відновлення МГЕС.

*Метою досліджень* є пропозиції щодо прогнозування гідролого-морфологічних характеристик річок на стадії ТЕО проектів відновлення МГЕС.

**Розрахунковий напір як основний чинник змін гідролого-морфологічних характеристик рік.** Об'єкти малої гідроенергетики, що були вибрані нами в якості прикладів, були законсервовані ще в 80-х рр. минулого століття, і з тих пір регулювання рівнів води у б'єфах відбувалося природним чином. В рамках ТЕО проектів відновлення Велико-Сорочинської на р. Псел в Полтавській області, Чижівської на р. Случ в Житомирській області та Більче-Золотецької МГЕС на р. Серет в Тернопільській області пропонувалися наступні варіанти реконструкції гідроспоруд і модернізації МГЕС:

*варіант 1* – застосування більш вартісних гідроагрегатів з можливістю не збільшувати напір, що використовувався раніше, і таким чином зберегти в максимально недоторканому стані поточний стан довкілля, що сформувався в попередні роки консервації об'єктів;

*варіант 2* – підняття розрахункового напору на 2–3 м, що дозволяло б збільшити встановлену потужність станцій при менш вартісних агрегатах.

Таким чином, розрахунковий напір розглядався в якості основного чинника змін гідролого-морфологічних характеристик рік при відновленні МГЕС.

В першому наближенні, в залежності від напору, величина поширення статичного підпору води вздовж течії ріки у верхньому б'єфі буде [2]:

$$L_{\text{під}} = k \frac{H}{I}, \quad (1)$$

де  $k$  – коефіцієнт, що залежить від типу водотоку,  $k = 1,2 \div 2,2$ , встановлюється за аналогами шляхом розв'язання оберненої задачі;  $H$  – напір, м;  $I$  – ухил ділянки водотоку, м/км.

Зони виклинювання підпору води у верхніх б'єфах Велико-Сорочинської, Чижівської та Більче-Золотецької МГЕС при їх відновленні за варіантом 1 наведено на рис. 1. Розрахунки показали, що заплановане за варіантом 2 збільшення напору призведе до збільшення величини поширення статичного підпору води на Велико-Сорочинській МГЕС з 12 до 22 км, Чижівської МГЕС – з 5 до 16 км, Більче-Золотецької МГЕС – з 5 до 12 км.

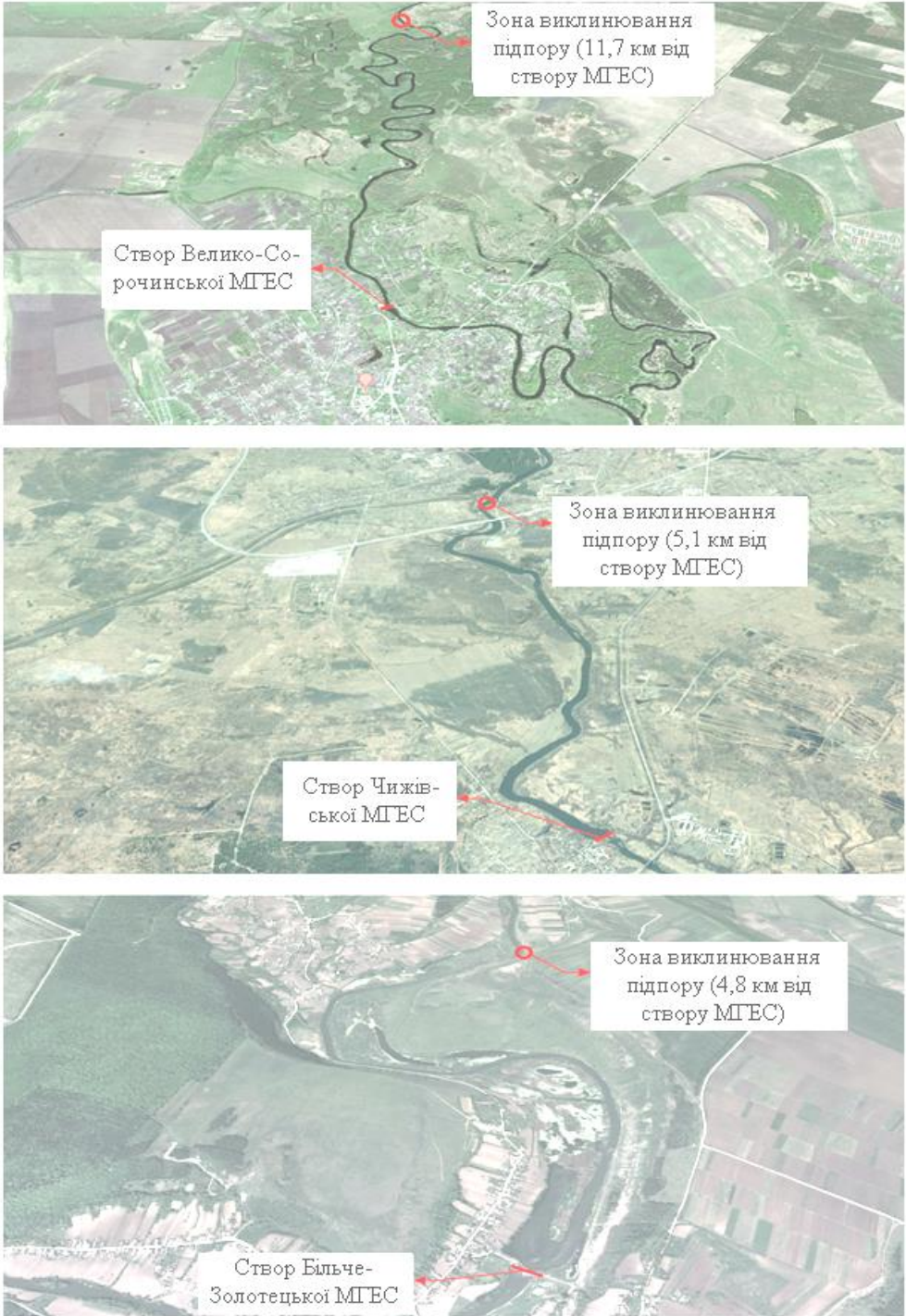


Рис. 1 – Поширення статичного підпору води у верхніх б'єфах Велико-Сорочинської, Чижівської та Більче-Золотецької МГЕС при їх відновленні за варіантом 1

Відповідно, протяжність зон переформування русел та берегової лінії у верхніх б'єфах Велико-Сорочинської, Чижівської та Більче-Золотецької МГЕС при запланованому збільшенні напору  $\sim 1,5$  разу зросте в 2–3 рази.

Збільшення напору призведе також до збільшення площ водної поверхні водосховищ МГЕС, збільшення площ не тільки постійного, а й тимчасового затоплення і підтоплення прирічкових територій. При існуючих й попередніх напорах на МГЕС під затоплення і підтоплення, в тому числі тимчасове, попадають лише землі водного фонду відповідних ділянок водотоків. Однак навіть незначне збільшення встановленого напору може загрожувати тимчасовими затопленнями і підтопленнями не лише землям водного фонду, а і ділянкам житлової забудови населених пунктів, особливо при відновленні Велико-Сорочинської МГЕС.

На рис. 2 показано межі зон постійного й тимчасового затоплення прирічкових територій при піднятті напору на Велико-Сорочинській МГЕС на 1,5 м. При цьому, якщо при піднятті напору на 1,5 м затоплюється лише водоохоронна зона р. Псел, то при збільшенні встановленого напору ще на 0,5 м тимчасове затоплення при проходженні паводків загрожуватиме житловим будівлям та угіддям.



Рис. 2 – Межі затоплення прилеглих територій на ділянці Великих Сорочинців при піднятті напору на Велико-Сорочинській МГЕС на 1,5 м

При зміні напору змінюється рівень зарегулювання водотоку. В якості показника рівня зарегулювання стоку ріки можна використати коефіцієнт трансформації стоку [1]:

$$\beta = W_k / W_0 ; \quad (2)$$

де  $W_k$  – корисний об'єм водосховища, млн. м<sup>3</sup>;  $W_0$  – об'єм річкового стоку, млн. м<sup>3</sup>.

У табл. 1 наведені результати розрахунків коефіцієнта трансформації річкового стоку при двох варіантах встановлення розрахункового напору при відновленні Велико-Сорочинської, Чижівської та Більче-Золотецької МГЕС. Можна зауважити, що зі збільшенням величини встановленого напору рівень зарегулювання річок за рахунок збільшення корисного об'єму водосховища закономірно зростає. Однак це зростання відбувається по-різному на різних ріках, що також може вказувати на допустимість чи недопустимість збільшення напору при відновленні МГЕС.

При цьому, в одних випадках важливо, щоб при відносно меншому збільшенні встановленого напору на МГЕС забезпечувалося відносно більше зростання величини коефіцієнта трансформації стоку, в інших – навпаки.

Якщо, наприклад, поряд з відновленням МГЕС переслідується й мета підвищити надійність водопостачання населених пунктів, промислових об'єктів, забезпечити можливість використання водних ресурсів для потреб сільського господарства тощо, то збільшення коефіцієнта трансформації стоку сприятиме реалізації цієї мети.

Таблиця 1. Результати розрахунку коефіцієнтів трансформації річкового стоку при різних варіантах відновлення МГЕС

МГЕС	Напір $H$ , м		Корисний об'єм водосховища $W_k$ , млн м <sup>3</sup>		Коефіцієнт трансформації стоку $\beta$	
	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 1	Варіант 2
Велико-Сорочинська	2,24	4,24	0,81	1,59	0,0007	0,0012
Чижівська	2,75	5,75	0,98	2,94	0,0007	0,0025
Більче-Золотецька	6,00	8,50	2,14	5,35	0,0007	0,0017

Якщо мета комплексного використання водних ресурсів не переслідується, або коли значна увага приділяється вирішенню екологічних проблем в б'єфах, то більш прийнятним варіантом є відносно менше збільшення коефіцієнта трансформації стоку в порівнянні з відносно більшим зростанням напору.

Так, якщо у випадку Чижівської МГЕС при збільшенні встановленого напору в 2,09 разу коефіцієнт трансформації стоку збільшується в 3,57 разу, для Більче-Золотецької при збільшенні напору в 1,42 разу коефіцієнт трансформації стоку збільшується в 2,43 разу, то для Велико-Сорочинської МГЕС при збільшенні напору в 1,89 разу маємо збільшення коефіцієнта трансформації стоку лише в 1,71 разу. Відповідно можуть розглядатися різні варіанти комплексного використання водних ресурсів при відновленні МГЕС.

**Прогнозування основних гідролого-морфологічних характеристик річок при відновленні експлуатації МГЕС.** При експлуатації руслових МГЕС в б'єфах спостерігається перепад рівнів води, пов'язаний з витратами води, що проходять через турбіни.

Перепад рівнів води  $h_w$  в б'єфах буде пропорційним приросту витрати води, що проходить через живий переріз водойми (водотоку), та залежатиме від ширини водойми (водотоку)  $B$  в б'єфі [3]:

$$h_w = \frac{\Delta Q}{(gh)^{0,5} \cdot B}, \quad (3)$$

де  $\Delta Q$  – максимальна пропускна здатність турбін, м<sup>3</sup>/с;  $g$  – прискорення вільного падіння, 9,8 м/с<sup>2</sup>;  $h$  – середня глибина води в б'єфі, м.

В нижньому б'єфі при цьому виникає хвиля попуску, яка переміщується вниз за течією, максимальне значення амплітуди якої буде [3]:

$$A_l = h_w \cdot e^{-2\pi\left(\frac{l}{T \cdot u}\right)}, \quad (4)$$

де  $l$  – середня довжина, м,  $T$ ,  $u$  – період та швидкість переміщення хвилі попуску.

У табл. 2 наведені результати прогнозування перепаду рівня води у верхньому б'єфі для двох варіантів відновлення МГЕС при максимальних турбінних витратах.

Таблиця 2. Результати розрахунків перепаду рівнів води у верхніх б'єфах МГЕС при різних варіантах їх відновлення

МГЕС	Турбінна витрата $\Delta Q$ , м <sup>3</sup> /с		Середня глибина в б'єфі $h$ , м		Перепад рівня в б'єфі $h_w$ , м	
	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 1	Варіант 2
Велико-Сорочинська	37	42	2,0	3,5	0,21	0,19
Чижівська	26	38	2,3	3,2	0,06	0,09
Більче-Золотецька	30	37	3,5	4,0	0,12	0,08

Інтенсивність абразії берегової лінії водосховища  $X$ , м/рік, можна оцінити за наступною формулою [4]:

$$X = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \frac{\rho_w}{\rho} \frac{(h + h_1)}{(H + h_a)} (B - 2B_1), \quad (5)$$

$$k_1 = [B_1 / (B - B_1)]^2, \quad k_2 = \frac{1}{2h_a} [(h_1 - h_0) + (t_1/t)(h_0 - h_2)], \quad k_3 = \frac{h_1}{h_a}, \quad (6)$$

де  $k_1$  – коефіцієнт асиметрії русла;  $k_2$  – коефіцієнт розмиву берегів;  $k_3$  – коефіцієнт зволоження ґрунтів берегової лінії;  $B_1$  – ширина водойми від лінії найбільшої глибини до розмиваючого берегу, м;  $h_a$  – висота берега водойми, м;  $h_1$  – висота рівня води у водосховищі під час піку повені, м;  $h_0$  – висота рівня води у межінь, м;  $h_2$  – висота рівня води в момент закінчення повені, м;  $t_1$  і  $t$  – тривалість повені від початку до піку та закінчення, відповідно, діб;  $\rho_w$  – щільність води, т/м;  $\rho$  – середня щільність ґрунтів берегової лінії, г/см<sup>3</sup>.

Результати прогнозування інтенсивності абразії берегової лінії водосховищ Велико-Сорочинської, Чижівської та Більче-Золотецької МГЕС для двох варіантів їх відновлення наведено в табл. 3.

Таблиця 3. Результати прогнозування інтенсивності абразії берегової лінії водосховищ МГЕС при різних варіантах їх відновлення

МГЕС	Швидкість абразії $X$ , м/рік	
	Варіант 1	Варіант 2
Велико-Сорочинська	0,47	1,74
Чижівська	0,39	1,23
Більче-Золотецька	0,16	1,04

Відстань, на якій прогнозується осідання наносів на дно водосховища  $L_\zeta$ , км, довжину призми замулення  $L_0$ , км, відстань, на яку прогнозується поширення регресивної акумуляції наносів  $L$ , км, можна оцінити за формулами [1, 2]:

$$L_\zeta = \frac{h}{v_{in}} v_{nd}, \quad (7)$$

$$L_0 = \frac{H - h_3}{I - I_3}, \quad (8)$$

$$L = \frac{\Delta H}{I - I_3}, \quad (9)$$

$$v_{in} = w \left( 1 - \frac{v_{nd}}{v_n} \right), \quad v_n = 3,83d^{1/3}h^{1/6}, \quad \zeta = 3,78n^2 \sqrt{\frac{B \cdot g \cdot w \cdot S_m}{Q}}, \quad h_\zeta = Q/1,73 \sqrt{g \cdot w \cdot S_i}, \quad (10)$$

де  $v_{oc}$  – швидкість осідання наносів, м/с;  $v_n$  – критична швидкість розмиву, м/с;  $v_{cp}$  – середня швидкість течії, м/с;  $w$  і  $d$  – середня та максимальна крупність наносів, мм;  $\zeta$  і  $h_\zeta$  – ухил та глибина ділянки водотоку, при яких процеси акумуляції наносів припиняються;  $n$  – коефіцієнт шорсткості;  $S_m$  – мутність води, г/м<sup>3</sup>;  $Q$  – витрата води, що проходить через створ МГЕС, м<sup>3</sup>/с;  $\Delta H$  – різниця між відмітками підпертого та природного рівнів води, м.

Результати прогнозування замулення водосховищ Велико-Сорочинської, Чижівської та Більче-Золотецької МГЕС для двох варіантів їх відновлення наведено у табл. 4.

Таблиця 4. Результати прогнозування замулення водосховищ МГЕС при різних варіантах їх відновлення

МГЕС	Відстань $L_c$ , км		Відстань $L_0$ , км		Відстань $L$ , км	
	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 1	Варіант 2
Велико-Сорочинська	2,20	2,97	2,1	2,8	1,1	2,1
Чижівська	2,70	5,65	1,3	2,3	4,4	8,9
Більче-Золотецька	5,89	8,35	1,0	1,5	5,3	7,4

Параметри трансформації русла в нижньому б'єфі, в першому наближенні, можна оцінити за формулами [2, 3]:

$$\Delta z_t = \Delta z_0 \cdot t^{-\alpha}, \quad (11)$$

$$h_{i\bar{a}} = k \frac{Q \cdot I}{B \cdot d}, \quad (12)$$

де  $\Delta z_t$  – відмітка рівня води у нижньому б'єфі через  $t$  років експлуатації МГЕС, м, при початковій відмітці  $\Delta z_0$ ;  $h_{i\bar{a}}$  – глибина ями розмиву в руслі, м;  $Q$  – витрата води, м<sup>3</sup>/с;  $I$  – ухил ділянки русла;  $B$  – ширина русла;  $d$  – максимальна крупність наносів;  $\alpha$ ,  $k$  – емпіричні коефіцієнти, що можуть встановлюватися за аналогами шляхом розв'язання обернених задач.

**Висновки.** Різні варіанти відновлення МГЕС в різній мірі можуть призводити до змін гідролого-морфологічних характеристик річок, що негативно впливають на екологію річок та прилеглих до них територій. Прогнозування цих змін є актуальною задачею в рамках ОВНС проектної діяльності, оцінки загального екологічного стану річки та прирічкових територій. В якості основного чинника змін гідролого-морфологічних характеристик рік при відновленні МГЕС може розглядатися напір, при цьому однією з задач ОВНС при відновленні МГЕС має бути порівняння варіантів встановлення різних розрахованих напорів.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Авакян А.Б. Опыт экологизации урвеневого режима водохранилищ (на примере Ивановского) / А.Б. Авакян, А.Е. Асарин // Пространственная структура и динамика распределения рыб во внутренних водоёмах. – Ярославль: ЯТГУ, 1998. – С. 71–83.
2. Беркович К.М. Русловые процессы на реках в сфере влияния водохранилищ / К.М. Беркович. – М.: Географический факультет МГУ, 2012. – 163 с.
3. Simon A. Adjustment and recovery of unstable alluvial channels: identification and approaches for engineering management / A. Simon // Earth Surface Processes and Landforms. Vol. 20. 1995. – P. 165–187.
4. Рекомендации по оценке и прогнозу размыва берегов равнинных рек и водохранилищ для строительства / ПНИИИС. – М.: Стройиздат, 1987. – 72 с.

*Стаття надійшла до редакції 18.02.2015*