

# НАУКА – НАУКОВО-ТЕХНІЧНОМУ ПРОГРЕСУ В ГІДРОЕНЕРГЕТИЦІ



УДК 532.542

**ГУРИН В.А.**, докт. техн. наук, професор,  
**РЯБЕНКО О.А.**, докт. техн. наук, професор,  
**ТИМОЩУК В.С.**, аспірант,  
Національний університет водного господарства  
та природокористування  
**ЧЕРНОБИЛЬ О.Є.**, канд. техн. наук, головний спеціаліст  
ПАТ "Укргідропроєкт"

## НАУКОВЕ СУПРОВОДЖЕННЯ КОРИГУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ДАМБ ВЕРХНЬОЇ ВОДОЙМИ ДНІСТРОВСЬКОЇ ГАЕС ПІД ЧАС БУДІВНИЦТВА

*Розглядаються особливості сучасного етапу будівництва Дністровської ГАЕС. Здійснюється порівняння з найпотужнішими подібними станціями світу. Робиться висновок про необхідність здійснення наукового супроводження будівництва таких унікальних об'єктів.*

**Б**удівництво Дністровської ГАЕС відіграє велику роль у реалізації стратегії розвитку гідроенергетики України. Станція відноситься до числа найпотужніших ГАЕС світу (Табл. 1) [1, 2]. Необхідно зазначити, що нинішній період розвитку світової гідроенергетики характеризується бурхливим ростом будівництва ГАЕС. На цей час в світі експлуатується

більше 300 таких станцій загальною потужністю 125 тис. МВт, в тому числі у США – 38, Японії – 38, Німеччині – 35, Іспанії – 23, Швейцарії – 18, Австрії – 16, Україні – 3. Зараз будуються такі станції потужністю біля 30 тис. МВт. Характерно, що за останні 25 років потужність ГАЕС світу збільшилась в 3 рази [3, 4].

Таблиця 1. Характеристики ГАЕС потужністю понад 1500 МВт

№ з/п	ГАЕС	Країна	Рік введення	Турбінний режим			Насосний режим			Водосховище	
				Максимальна потужність, МВт	Максимальна витрата м <sup>3</sup> /с	Максимальний напір, м	Максимальна потужність, МВт	Максимальна подача, м <sup>3</sup> /с	Максимальний напір, м	Повний об'єм, млн. м <sup>3</sup>	Площа при НПР, км <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Бет Коунті	США	1984	3000	852	385	2875,8	801	385	13,8	1,07
2	Канагава	Японія	Буд.	2700		653					
3	Дністровська	Україна	Буд.	2268	1890	155,4	2856	1834	165,6	38,8	2,54
4	Ладінгтон	США	1973	2058		107,7	1978,8	1884	113,6	100	3,4
5	Окутатарагі	Японія	1974	1932	376	406	1956	288	182,2	33,39	5,2
6	Дінорвік	Великобританія	1982	1800	420	513	1890	1595	544		
7	Тіанхуанпінг	Китай	Буд.	1800	392	667	1860	332	614	9,19	0,33
8	Гранд Мейсон	Франція	1987	1800	380	905	1850	204	955	140	
9	Тумут 3	Австралія	1973	1689		161,5	582	297	164,6		
10	Казуногава	Японія	1999	1648	280	712,4	1752	201,2	778		
11	Мінгтан	Китай (Тайвань)	1992	1620		401	1650		411		
12	Кайшадор	Литва	1993	1600	1808	111,5	1600	1512	111,5		
13	Кастаік	США	1973	1566		328	1275	544,8	350,5	401	9,03

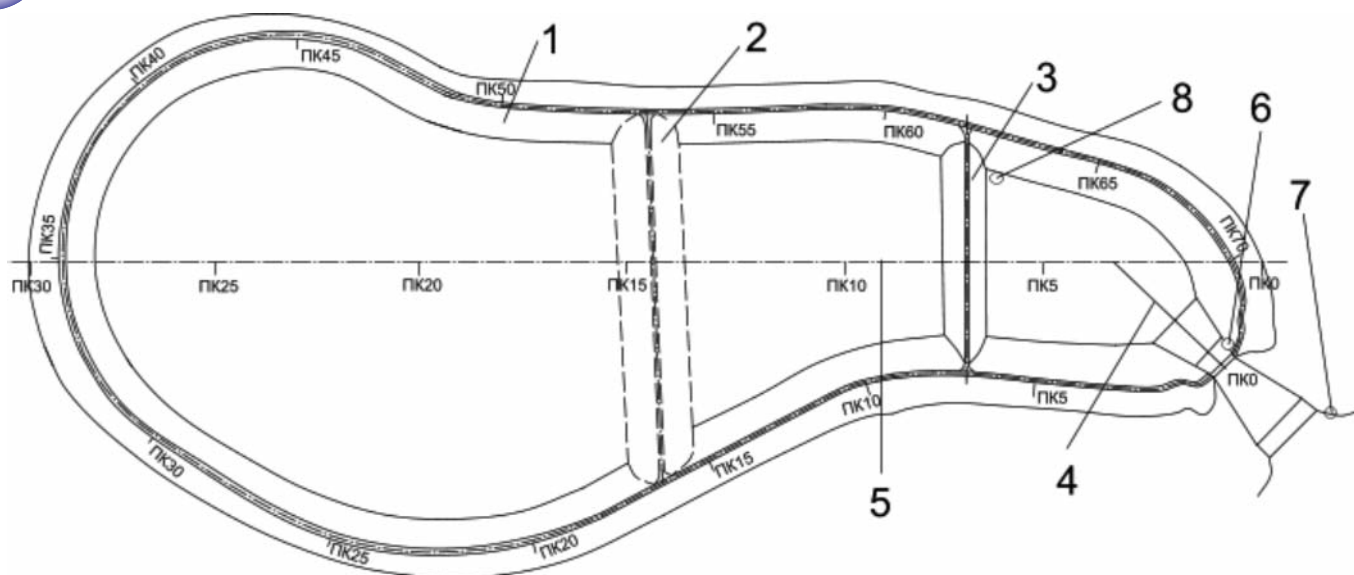


Рис. 1. Черги будівництва верхньої водойми Дністровської ГАЕС:

1 – огорожувальна дамба, 2 – перегороджувальна дамба на ПК-15, 3 – перегороджувальна дамба на ПК-7, 4 – вісь водоприймача, 5 – вісь водойми, 6 – місце розміщення існуючого датчика тиску у верхньому б'єфі, 7 – місце розміщення існуючого датчика тиску у нижньому б'єфі, 8 – місце встановлення додаткового датчика тиску у верхній водоймі

Верхня водойма Дністровської ГАЕС розташована на вузькому високому мисі правого схилу долини р. Дністер в 10 км нижче м. Новодністровськ. Конфігурація водойми, утвореної огорожувальною дамбою довжиною 7300 м, визначається рельєфом місцевості і обмежується долиною річки Сокирянка (Сокирянський схил) та системою Волошківських ярів (Дністровський схил).

Враховуючи значні обсяги робіт, велику тривалість будівництва, особливості процесу фінансування, а також можливість поліпшення техніко-економічних показників об'єкта шляхом його поетапного введення в експлуатацію, проектом [5] було передбачено дві черги будівництва Дністровської ГАЕС – відповідно із 3 та 7 агрегатів (Табл. 2).

З метою створення необхідного об'єму води для роботи перших трьох агрегатів (№ 1–3) у проекті спочатку передбачалося влаштування першої черги верхньої водойми шляхом будівництва тимчасової перегороджувальної дамби, довжиною 952 м, на ПК-15 (пикетаж по осі водосховища). Проте в реальних умовах фактичного ходу фінансування та будівництва об'єкта виникла необхідність зменшення площі першої черги верхньої водойми та відповідно коригування положення тимчасової перегороджувальної дамби. Така дамба, довжиною 659 м, була побудована на ПК-7 (Рис. 1).

Прийняте рішення дозволило забезпечити якнайшвидший пуск в експлуатацію першого агрегату, зменшити обсяги капіталовкладень пускового комплексу, а також здійснити якісне проведення повного об'єму пусконаладжувальних робіт на агрегаті № 1. Завдяки прийнятим заходам пуск першого агрегату Дністровської ГАЕС як у насосному, так і генераторному режимах відбувся в 2009 році.

Порівняння характеристик верхніх водойм ГАЕС світу (Табл. 1) показує, що верхня водойма Дністровської ГАЕС за своїм об'ємом та площею відноситься до числа найбільших водойм цього типу. Тут доречно зауважити, що при будівництві гідроакумулюючих станцій для створення верхньої водойми іноді вдається використати існуюче природне озеро з великим об'ємом та площею. Таке рішення дозволяє полегшити умови експлуатації станції та істотно зменшити вартість будівництва за рахунок відсутності необхідності влаштування огорожувальних дамб великої довжини.

Цікаво зазначити, що з точки зору зменшення негативного впливу на навколишнє середовище

Таблиця 2. Характеристики верхньої водойми Дністровської ГАЕС

№ з/п	Назва характеристик	Одиниці виміру	Черговість будівництва		
			1 агрегат	3 агрегати	7 агрегатів
1	Позначка ННР	м	222.500	229.500	229.500
2	Позначка РМО	м	215.500	215.500	215.500
3	Повний об'єм	млн.м <sup>3</sup>	3.30	13.9	38.8
4	Корисний об'єм	млн.м <sup>3</sup>	1.95	11.45	32.7
5	Площа при позначці ННР	тис.м <sup>2</sup>	302	900	2540
6	Площа при позначці РМО	тис.м <sup>2</sup>	260	720	2190



та вилучення земель із сільськогосподарського користування верхні водойми ГАЕС є досить економічними, у порівнянні з водосховищами, створеними для потреб інших галузей енергетики. Проведений аналіз характеристик водосховищ, використовуваних у енергетиці, показав, що площі верхніх водойм ГАЕС у 600–2000 раз менші, ніж водосховищ потужних ГЕС і у 2,1–2,6 рази менші, ніж водосховищ-охолоджувачів ТЕС співрозмірних потужностей [4].

Унікальними є також максимальні витрати Дністровської ГАЕС, як для турбінного і насосного режимів становлять 1890 м<sup>3</sup>/с та 1834 м<sup>3</sup>/с відповідно. При цьому витрата одного агрегату в турбінному режимі дорівнює 270 м<sup>3</sup>/с, а в насосному 262 м<sup>3</sup>/с. Такі режими істотно впливають на експлуатацію споруд і обладнання ГАЕС [6]. Параметри огорожувальної та перегороджувальних дамб (позначки гребенів, обриси та тип кріплення укосів, конфігурація у плані, тощо) істотно залежить від гідравлічних режимів у верхній водоймі, пов'язаних з турбінним і насосними періодами роботи станції.

Особливістю гідравлічних режимів роботи ГАЕС є те, що пуск, зупинка та зміна потужності агрегатів станції викликають виникнення в аванкамері, відвідному каналі, верхній та нижній водоймах неусталеного руху води, який супроводжується утворенням хвиль переміщення. Серед режимів пуску – зупинки агрегатів станції, як особливий, необхідно виділити режим раптової зупинки агрегатів (так звана "втрата приводу") у насосному режимі. Зазначені режими роботи Дністровської ГАЕС істотно ускладнюються утворенням вітрових хвиль на поверхні водойми та накладанням цих типів хвиль в умовах одночасного їх виникнення.

Відповідно до результатів розрахунків параметрів гідравлічних режимів, виконаних у ПАТ "Укргідропроєкт" з використанням чисельного моделювання [5], а також до результатів гідравлічного моделювання [7] хвильовий режим роботи верхньої водойми Дністровської ГАЕС при експлуатації всіх агрегатів можна характеризувати таким чином:

1. Для району водойми є характерними вітри приблизно однакової швидкості всіх румбів. Розрахункова швидкість вітру 2 % забезпеченості складає 22 м/с. Вітрова хвиля 1 % забезпеченості при нормальному підпертому рівні має висоту 1.0 м при періоді 3 с. На рівні мертвого об'єму розрахункова висота хвилі – 0.7 м.

2. Максимальна висота хвиль при "втраті приводу" в насосному режимі дорівнює 1.0 м

біля водоприймача і – 0.7 м в широкій частині водойми.

3. Хвилі пуску–зупинки при ННР в турбінному режимі досягають 0.8 м біля водоприймача, 0.5 м на – протилежній частині акваторії і до 0.5 м біля бортів. За винятком торців водойми ці хвилі рухаються вздовж кріплення укосів. При РМО в турбінному режимі висота хвиль пуску–зупинки не перевищує 0.5 м. Розрахунковий час затухання хвиль пуску–зупинки становить від 40 до 55 хв.

4. Розрахункові хвилі пуску–зупинки при ННР в насосному режимі досягають 0.6 м. При РМО на більшій частині акваторії висота цих хвиль не перевищує 0.6 м.

Виходячи з аналізу даних про хвилі у верхній водоймі, встановлено, що для більшої частини акваторії найбільш невигідне поєднання хвиль буде при ННР, коли накладаються вітрові хвилі заввишки 1.0 м з хвилями висотою 0.7 м, що виникають при "втраті приводу" у насосному режимі.

В умовах великої тривалості будівництва, а особливо при створенні унікальних об'єктів, звичайно відбуваються певні зміни у проектах за якими розпочалося таке будівництво. Стосовно верхньої водойми Дністровської ГАЕС ці зміни викликані такими причинами.

1. Частково змінена планова конфігурація водойми за рахунок деякого фактичного зміщення осі перегороджувальної дамби.

2. Змінено поперечний профіль огорожувальної дамби.

3. Змінена конструкція кріплення дна, похили та позначки дна похилої частини водойми.

4. Замість влаштування перегороджувальної дамби на ПК-15 фактично була побудована така дамба на ПК-7.

Вказані зміни істотно впливають на реальні значення гідравлічних параметрів потоку, висоту гребеня огорожувальної і перегороджувальної дамб і вимагають наукового супроводження будівельних робіт на об'єкті, подібно до того, як це здійснювалося при будівництві захисних споруд м. Санкт-Петербурга.

Методики чисельних розрахунків обрисів вільної поверхні потоку основані на вирішенні одновимірних та двохвимірних рівнянь Сен-Венана. При вирішенні задачі використовуються оригінальні числові алгоритми, адаптаційні три- та чотирикутні сітки, а також гібридне моделювання. Розглядувана задача є дуже складною, оскільки потрібно враховувати параметри працюючих агрегатів, глибини і конфігурацію конкрет-



ної водойми, велику кількість інших діючих факторів, а також поправочних коефіцієнтів. Через це, як на етапах проектування об'єкту, так і на етапах його будівництва та експлуатації дуже важливим є розуміння динаміки процесів, що відбуваються у водоймі, особливо їх критичних режимів з можливими катастрофічними наслідками: переповнення водойми, перелив води через огорожування дамби внаслідок хвилових процесів, розмив дна відвідного русла тощо [6].

Основною задачею в даних розрахунках є визначення позначок вільної поверхні та поля швидкостей. Визначення даних параметрів виконується в ході розрахунків, що ілюструють різні режими роботи ГАЕС на основі заданих параметрів агрегатів станції та враховуючи конфігурацію водойми та рельєф дна.

Вибір математичної моделі для опису даного фізичного явища потребує попереднього його аналізу з виявленням пріоритетних параметрів. Співвідношення планових розмірів верхньої водойми Дністровської ГАЕС дає можливість вивчати гідрофізичні процеси в ньому у термінах теорії мілкої води. Диференціальне рівняння опису даного процесу має вигляд [8]:

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0, \\ \frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial(u^2h + \frac{1}{2}gh^2)}{\partial x} + \frac{\partial(uvh)}{\partial y} = 0, \\ \frac{\partial(vh)}{\partial t} + \frac{\partial(uvh)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2h + \frac{1}{2}gh^2)}{\partial y} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

де  $u, v$  – компоненти горизонтальної швидкості,  $h = H + \eta$  – повна глибина,  $H$  – глибина незбуреного шару рідини.

Існує також дещо спрощена форма запису цієї системи рівнянь [9]:

$$\begin{cases} u_t + uu_x + vu_y + g \eta_x = f_1, \\ v_t + uv_x + vv_y + g \eta_y = f_2, \\ \eta_t + (uh)_x + (vh)_{y,x} = f_3, \end{cases} \quad (2)$$

де  $\eta$  – зміщення вільної поверхні,  $g$  – прискорення вільного падіння,  $f_i$  – значення, що описують дію зовнішніх факторів.

Геометрія верхньої водойми ГАЕС (Рис. 1) характеризується значним перевищенням її горизонтальних розмірів над вертикальними, витягнутістю вздовж одного із горизонтальних напрямків та малими змінами поля глибин.

Важливим параметром розрахунків є час про-

цесу, який задається тривалістю наповнення та спрацювання водойми. При цьому важливо враховувати геометрію огорожувальної дамби та динаміку зміни вільної поверхні. Витягнутість водойми дозволяє на попередньому етапі проводити розрахунки за одновимірною моделлю Сен-Венана, яка має більш високий ступінь ієрархії наближених гідравлічних моделей і дозволяє в одновимірній постановці враховувати ефекти зміни ширини русла.

Умови, що накладаються на модель:

- поперечні складові швидкості малі в порівнянні з повздовжніми, відцентровий ефект, що створюється кривизною водосховища, не враховується;

- малий похил дна;

- сили опору, що вводяться в рівняння є в тому ж вигляді, як і для рівномірного руху; вважається, що сумарний вплив сил тертя і турбулентності можна врахувати у вигляді деякої сили опору.

За таких умов рівняння Сен-Венана набуде вигляду [10]:

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial \eta}{\partial x} + g \frac{Q|Q|}{C^2 AR} - vq \cos \phi = 0, \\ \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q, \end{cases} \quad (3)$$

де  $A = \int_B h' dy$  – площа поперечного перерізу,

$Q = \int_B h' \bar{v} dy = A \bar{u}$  – витрата,  $B$  – ширина живого

перерізу русла,  $\alpha = \frac{A}{Q^2} \int_A u^2 dA$  – коефіцієнт роз-

поділу швидкості (коефіцієнт Буссінеска),  $C$  – коефіцієнт Шезі.

В більш повній постановці, задачу можна розглядати в трьохвимірному вигляді потенціального руху ідеальної рідини з вільною поверхнею, яка в довільній системі координат зводиться до визначення потенціалу швидкості і функції, що описує вільну поверхню.

При аналізі результатів, отриманих шляхом чисельного та гідравлічного моделювання [5,7] особливої цінності набувають результати натурних досліджень, які автоматично враховують весь комплекс діючих факторів – закони руху рідини, описувані диференціальними рівняннями в частинних похідних, особливості роботи агрегатів ГАЕС у турбінному і насосному режимах, розміри і конфігурацію споруд, геометрію верхнього та нижнього водосховища, вплив вітрових хвиль тощо. Використовувані при цьому типи контроль-



но-вимірювальної апаратури повинні враховувати всі названі фактори і забезпечити необхідну точність отримуваних результатів.

Перший етап натурних досліджень гідравлічних режимів роботи верхньої водойми першої черги Дністровської ГАЕС при роботі першого агрегату був проведений з використанням існуючих датчиків тиску типу VEGAWELL72. Ці датчики встановлено у верхній і нижній водоймах станції (Рис. 1).

Під час обстеження роботи верхньої водойми Дністровської ГАЕС при роботі в турбінному та насосному режимах були виявлені хвилі переміщення, викликані роботою агрегату. Найбільш вираженими вони були при насосному режимі і відмітках води, близьких до НПР. Найбільша висота хвилі переміщення була зафіксована при зупинці агрегату в насосному режимі. Було виявлено, що гідравлічний режим є коливальним в часі, він характерний великою протяжністю і має затухаючий характер. В момент зупинки агрегату висота хвилі склала близько 22 сантиметрів. Це значення було виміряне датчиком тиску, що знаходиться біля лівого стояка аванкамери. Розташування цього датчика в області стояка дає можливість вимірювати гідродинамічний тиск при відсутності впливу вітрових процесів і зменшення впливу нерівномірності розподілу швидкостей та тисків. Згадані значення були отримані лише в місцях розміщення датчиків, що не дає повної картини і потребує отримання більш повних результатів у кількох точках верхньої водойми.

З урахуванням досвіду проведення натурних досліджень було прийнято рішення про необхідність розміщення додаткового датчика тиску на дні верхньої водойми біля огорожувальної дамби на ПК 63+60 (пікетаж по осі цієї дамби). Наявність такого додаткового датчика тиску дозволить отримувати більш повні миттєві дані про зміни в часі рівнів води у верхній водоймі, як на етапі роботи першого агрегату Дністровської ГАЕС, так і на наступних етапах будівництва і експлуатації станції.

## Висновки

1. Будівництво таких унікальних гідроенергетичних об'єктів, як Дністровська ГАЕС, потребує відповідного наукового супроводження, яке повинно враховувати реальну ситуацію на об'єкті і виробляти необхідні рекомендації для внесення відповідних корективів в процес будівництва.

2. Використання додаткового датчика в комплексі з існуючими дозволить у майбутньому при проведенні натурних досліджень отримати надійну інформацію про характер гідравлічних хвильових процесів безпосередньо біля огорожувальної та перегороджувальної дамб верхньої водойми як при роботі першого агрегату, так і на етапах введення в експлуатацію наступних агрегатів Дністровської ГАЕС.

## ЛІТЕРАТУРА

1. *Гидроэнергетика* и окружающая среда / Под общ. ред. Ю. Ландау, Л. Сиренко. — К.: Либра, 2004. — 484 с.
2. <http://wikipedia.org>.
3. *Воциньский К.В.* Будівництво Дністровської гідроакумуляуючої станції // Гідроенергетика України. — 2009. — № 3. — С. 2–3.
4. *Поташик С.И.* Состояние и перспективы строительства Днестровской ГАЭС // Гидроэнергетика Украины. — 2004. — № 3. — С. 18–21.
5. *Дністровська ГАЕС.* Перша черга ГАЕС в складі 3-х агрегатів. Завершення будівництва. Проект. Загальна пояснювальна записка. 732-1-Т4 — Харків, ВАТ "Укргідропроект", 2005. — 236 с.
6. *Гурин В.А., Рябенко О.А.* Вплив гідравлічних режимів на експлуатацію споруд і обладнання ГЕС та ГАЕС // Гідроенергетика України. — 2011. — № 3–4. — С. 11–14.
7. *Давлетшин В.Х., Осадчук В.О., Хом'як Р.В.* Дослідження розмиву кріплення укосів з гірської маси під дією хвиль при циклічній зміні рівня води верхнього водоймища Дністровської ГАЕС // Гідроенергетика України. — 2006. — № 3. — С. 18–23.
8. *Moler Cleve B.*, Numerical Computing with MATLAB, MathWorks, 2011.
9. *Чугаев Р.Р.* Гидравлика: учебник для вузов. — 4-е изд. доп. и перераб. — Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. — 672 с.
10. *Эббот М.Б.* Численная гидравлика. Гидравлика открытого потока. М.: Энергоатомиздат, 1983. — 272 с.

© Гурин В.А., Рябенко О.А., Тимошук В.С., Чернобил О.С., 2012

