

УДК 532.5.032:621.22:519.633

ВПЛИВ ХВИЛЬ ПЕРЕМІЩЕННЯ НА РОБОТУ ВЕРХНЬОЇ ВОДОЙМИ ДНІСТРОВСЬКОЇ ГІДРОАКУМУЛЮЮЧОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

О. А. Рябенко, д-р техн. наук

o.a.riabenko@nuwm.edu.ua

ORCID: 0000-0002-1923-3061

В. С. Тимошук, канд. техн. наук

v.s.tymoshchuk@nuwm.edu.ua

ORCID: 0000-0002-9545-1810

О. О. Клюха, канд. техн. наук

o.o.kluha@nuwm.edu.ua

ORCID: 0000-0002-4607-4465

О. О. Галич

o.o.halych@nuwm.edu.ua

ORCID: 0000-0002-8800-9792

Д. М. Поплавський

d.m.poplavskiy@nuwm.edu.ua

ORCID: 0000-0003-2756-3359

Національний університет водного
господарства та
природокористування,
33028, Україна, м. Рівне, вул. Соборна, 11

Висвітлюється роль гідравлічної енергії як надійного джерела відновлюваної енергії для забезпечення постійно зростаючих потреб суспільства. Аналізується нерівномірність характеру енергостачання протягом доби. Підкреслюється роль ГЕС та ГАЕС у регулюванні зазначеної нерівномірності під час роботи об'єднаної енергосистеми. Показано, що пуск, робота, регулювання потужності та зупинка агрегатів ГАЕС характеризуються виникненням в аванкамері, верхній водоймі та відповідному каналі неусталених гідравлічних режимів потоку. Ці режими супроводжуються утворенням хвиль переміщення, характеристики яких потрібно враховувати під час проектування та експлуатації споруд станції. Експлуатація Дністровської ГАЕС підтвердила, що у верхній водоймі цієї станції під час роботи її агрегатів у насосному і турбінному режимах утворюються хвилі переміщення. Наявність таких хвиль істотно впливає на положення відмітки гребеня огорожувальних дамб та стійкість кріплення верхнього укосу цих дамб в умовах дії знакозмінних хвильових навантажень. Наводяться результати натурних (експериментальних) та теоретичних досліджень параметрів хвиль переміщення у верхній водоймі зазначеної станції. Ці результати отримані для першого етапу будівництва Дністровської ГАЕС за наявності у верхній водоймі тимчасової роздільної дамби, розташованої на ПК 7+00. Натурні вимірювання були здійснені датчиком тиску мембранного типу VEGAWELL 72, який розташований у лівому стояку аванкамери. Показано, що найбільшій висоті хвиль спостерігаються у насосному режимі під час зупинки агрегату. Теоретичні розрахунки параметрів хвиль переміщення виконувалися на основі диференціального рівняння Сен-Венана за двовимірною методикою. Висоту хвиль визначали за допомогою гармонійного рівняння сейші для прогресивної хвилі. Показано, що для розрахункового випадку зупинки агрегату необхідно враховувати наявність бокового притоку води до основного потоку, що подається агрегатом. Порівняння теоретичних і експериментальних результатів показало їх задовільну збіжність.

Ключові слова: хвилі переміщення, датчик тиску, верхня водойма, укіс, ГАЕС.

Гідравлічна енергія є одним з основних видів відновлюваної енергії, що має задовольняти постійно зростаючі виробничі та побутові потреби суспільства. Наразі саме гідравлічна енергія забезпечує до 76% сумарної відновлюваної енергії, використовуваної у світі.

Існуючий Дністровський каскад складається з Дністровської ГЕС-1, Дністровської ГАЕС, Дністровської ГЕС-2 (Україна) та Дубоссарської ГЕС (Молдова). Дністровська ГАЕС – найамбітніший проект в сучасній Україні. Ця станція є невід'ємною складовою частиною енергетичної стратегії держави до 2030 року. Згідно з початковим проектом, Дністровська ГАЕС має складатися із семи гідроагрегатів загальною потужністю 2268 МВт в генераторному режимі та 2 947 МВт у насосному. Зазначені параметри ставлять її на шосте місце у світі за встановленою потужністю.

На сьогодні ГАЕС повністю готова і функціонує у складі трьох гідроагрегатів. У генераторному режимі вона сумарно здатна видати потужність 972 МВт, що практично дорівнює потужності одного блока атомної електростанції. Планується, що гідроагрегат № 4 станції буде введений у експлуатацію в 2020 році [1].

Як відомо, графік споживання електричної енергії протягом доби характеризується великою нерівномірністю. Досить часто регулювання цієї нерівномірності здійснюють за допомогою базових блоків теплових електростанцій потужністю 200–300 МВт. В умовах України кількість таких пусків-зупинок сягає до 3000 за рік. Крім того, для проходження нічних провалів у добовому графіку наван-

тажень доводиться виводити з роботи до десяти і більше блоків ТЕС за добу. Таке регулювання є досить дорогим та призводить до суттєвих поломок і виходу з ладу обладнання ТЕС. Для атомних електростанцій цей спосіб регулювання є взагалі небажаним [2].

Враховуючи вказані обставини, регулювання роботи енергосистеми прагнуть здійснювати за допомогою агрегатів ГЕС і ГАЕС, які характеризуються високою маневреністю. Характерно, що час набору повної потужності агрегатів цих станцій після їх зупинки становить 1–2 хв., а за роботи агрегатів у режимі холостого ходу цей час дорівнює всього 15–30 с. Для порівняння зазначимо, що вказаний час становить для агрегатів ТЕС (після їх зупинки) 90–180 хв., АЕС – 390–600 хв., а для режиму «гарячого» стану – ТЕС – 20–50 хв., АЕС – 60 хв. [3].

Характерним прикладом суттєвого розширення функцій ГАЕС є режим роботи Загорської ГАЕС. Число пусків оборотних агрегатів цієї станції досягає 440 в місяць а в окремі періоди – біля 30 пусків за добу без урахування пусків агрегатів у режимі синхронного компенсатора [12]. Кількість змін режимів роботи ГАЕС сягає до 4000–8000 за рік. Зокрема, ця кількість становить для ГАЕС Дракенсберг (ПАР) – 8000, Гільбоа (США) – 6000, Дінорвіг (Англія) – 5000 [4].

Пуск, робота, регулювання потужності та зупинка агрегатів ГАЕС характеризуються виникненням в аванкамері, верхній водоймі та відвідному каналі неусталених гідравлічних режимів потоку. Ці режими супроводжуються виникненням хвиль переміщення, характеристики яких потрібно враховувати під час проектування та експлуатації споруд станції. Забезпечення надійної роботи енергосистеми України досягається високою надійністю роботи станцій.

Специфічною особливістю роботи верхніх водойм ГАЕС, порівняно з водосховищами ГЕС, є більш напружений режим їх використання внаслідок регулярної періодичної зміни основних гідрофізичних полів (рівень вільної поверхні, розподіл тиску, швидкість течії тощо) за зміни режимів роботи. Тому як на етапі проектування об'єкта, так і на етапах його будівництва та експлуатації дуже важливим є врахування динаміки процесів, що відбуваються в водоймі [2–4].

В умовах інтенсивного будівництва та експлуатації ГАЕС в світі, зокрема і в Україні, питання розрахунків характеристик хвиль переміщення у верхніх водоймах під час роботи цих станцій є досить актуальним. Саме ці характеристики визначають відмітку гребеня огорожувальних дамб з урахуванням висоти накопчення на укис хвиль переміщення та вітрових хвиль, щоб забезпечити відповідну надійність об'єкта. Використання математичних моделей дозволяє визначити параметри утворюваних хвиль переміщення за різних гідравлічних режимів роботи ГАЕС. Натурні дослідження параметрів таких хвиль особливо важливі, оскільки вони є основним орієнтиром для підтвердження правильності існуючих математичних моделей та їх вдосконалення [3].

Існує кілька методик числового розрахунку висот хвиль переміщення на етапах їх виникнення та поширення у водоймах ГАЕС. В основі найбільш загальної математичної моделі закладена система рівнянь Нав'є-Стокса, але її використання має складності, зокрема: по-перше, потрібно дуже багато вихідних даних, які в явному вигляді важко описати, особливо граничні умови, та врахувати всі сили взаємодії; по-друге, складно здійснити розрахунок, оскільки інші математичні моделі з однаковим порядком точності можна розв'язати з меншою затратаю часу та зусиль [4].

Вивчаючи процеси руху рідини у відкритих водоймах, зазвичай використовуються математичні моделі теорії «мілкої води». Окрім того, повинна виконуватись умова, що глибина водойми мала порівняно з параметром довжини досліджуваної ділянки та ширини русла. Згадані моделі мають в основі рівняння нерозривності потоку, відповідне рівняння руху рідини, закон збереження маси. Відповідна система диференціальних двовимірних рівнянь Сен-Венана з врахуванням негоризонтальності дна та донного тертя має вигляд

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{\partial Q_1}{\partial x} - \frac{\partial Q_2}{\partial y},$$

$$\frac{\partial Q_1}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_1^2}{h} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q_1 Q_2}{h} \right) - gh \frac{\partial(h+Z)}{\partial x} + T_1, \quad \frac{\partial Q_2}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_1 Q_2}{h} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q_2^2}{h} \right) - gh \frac{\partial(h+Z)}{\partial y} + T_2,$$

де t – час, c ; x , y – просторові координати; h – глибина води, м; Q_1 , Q_2 – питомі витрати по осях x та y , м²/с; Z – відмітка дна, м; g – прискорення вільного падіння; T_1 , T_2 – донне тертя по осях x та y .

Результати натурних досліджень, отриманих шляхом числового та гідравлічного моделювання, набувають особливої цінності, оскільки 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 та конфігурацію споруд, геометрію верхнього водосховища, вплив вітрових хвиль тощо. Наприклад, на ГАЕС Жидово (Польща) хвилі переміщення під час пуску другого агрегату виявилися більшими, ніж очікувалось під час роботи трьох агрегатів. При цьому внаслідок хвильових процесів було частково розмито захисний шар кріплення дамб [3]. Для зменшення висот утворюваних хвиль переміщення були накладені обмеження під час пуску і зупинки агрегатів, з урахуванням прямої та зворотної хвиль.

Хвилі переміщення, що утворюються у верхніх водоймах ГАЕС, під час зупинки агрегату в насосному режимі досить чітко показують свою наявність руйнуванням захисного шару кріплення з піщано-гравійної суміші на відмітках нормального підпертого рівня (НПР) (рис. 1).



Рис. 1. Руйнування захисного шару кріплення з піщано-гравійної суміші

Розрахунки висот хвиль переміщення були проведені для першої черги Дністровської ГАЕС з проміжною дамбою на ПК7+00 пікетажу верхньої водойми. Вимірювання були зроблені датчиком тиску мембранного типу WEGAWELL72, який розташований у лівому стояку аванкамери.

Проведені розрахунки та натурні дослідження показали, що у водоймі під час пуску, роботи та зупинки агрегату в насосному режимі утворюються хвилі переміщення. Найбільші їхні висоти спостерігаються під час зупинки агрегату. Математична модель досить якісно описує утворення та поширення хвиль переміщення фазами хвиль, але є досить великі розбіжності по висоті у випадку зупинки агрегату. Зупинка агрегату відбувається в момент, коли потік є збуреним, що під час руху підхоплює боковий притік води та частково відхиляється до лівого стояка аванкамери.

Згідно з результатами натурних досліджень, боковий притік води до основного потоку має гармонічний характер, період якого можна визначити з результатів вимірювань. Висота гребня хвилі переміщення після зупинки агрегату, що була розрахована за двовимірною методикою в основі рівняння Сен-Венана, може бути описана гармонійним рівнянням сейші для прогресивної хвилі, а для врахування бокового притоку води до основного потоку був введений поправковий коефіцієнт. Тоді гармонійне рівняння сейші набуде вигляду

$$\eta = He^{\beta k} \cos\left(\frac{2\pi}{T\sqrt{gd}}x - \frac{2\pi}{T}t\right)$$

де H – висота хвилі, T – період хвилі, d – глибина водойми у створі при певній відмітці рівня води.

Коефіцієнт $e^{\beta k}$ враховує збільшення висоти хвиль переміщення, зумовлене боковим притоком води до основного потоку. Визначений коефіцієнт бокового притоку води у верхній водоймі Дністровської ГАЕС під час роботи одного агрегату в насосному режимі знаходиться в межах 1,79–1,87 при відмітках рівнів води, близьких до НІР=222,500 м. Врахувавши це значення в граничних умовах лівої межі математичної моделі для розрахунку висот хвиль переміщення в основі двовимірного диференціального рівняння Сен-Венана, отримуємо такий графік (рис. 2).

Після врахування бокового притоку води до основного потоку значення висоти для першої хвилі переміщення співпадає за фазою та висотою. Для подальшого розрахунку потрібно врахувати зміну періоду хвиль та їх затухання в часі з допомогою коефіцієнта k .

Після подальших досліджень параметрів хвиль переміщення у верхній водоймі Дністровської ГАЕС на повний об'єм їхні параметри суттєво не змінилися. На рис. 3 наведено результати натурних вимірювань з використанням 4 датчиків.

Висновки

1. В умовах інтенсивного будівництва ГАЕС питання розрахунків хвиль переміщення у верхній водоймі під час роботи цих станцій в насосному режимі є актуальним, оскільки вони є орієнтиром для перевірки прийнятих відміток гребеня огорожувальних дамб.

2. Використання сучасної контрольно-вимірювальної апаратури дозволяє достатньо точно виміряти необхідні параметри хвиль переміщення та прогнозувати їхній вплив на гідротехнічні споруди.

3. Отримані значення висот хвиль переміщення під час роботи одного агрегату не несуть особливої загрози для огорожувальних дамб, але в певній мірі руйнують кріплення укосів.

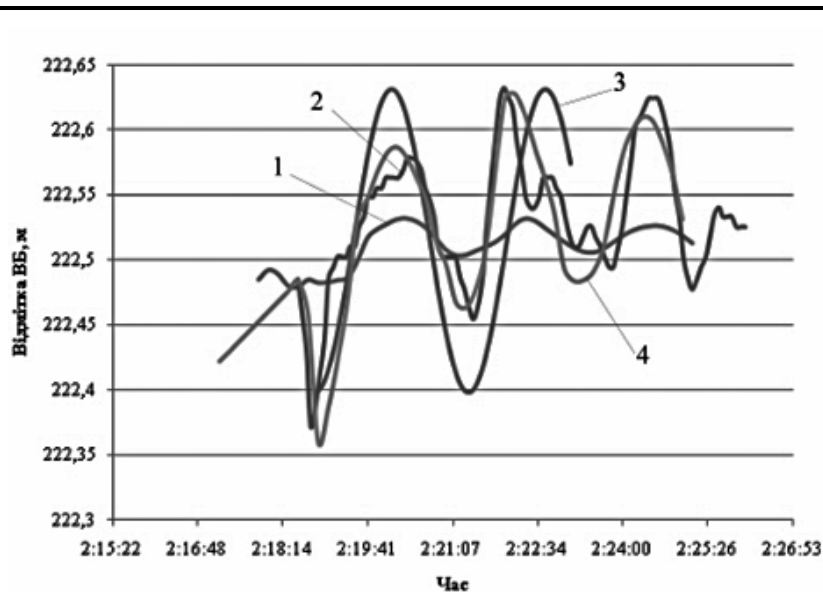


Рис. 2. Графік співставлення результатів математичного розрахунку та натурних досліджень на етапі зупинки агрегату Дністровської ГАЕС в насосному режимі:

1 – математичне моделювання за двовимірною методикою Сен-Венана, 2 – натурні дослідження, 3 – розрахунок з врахуванням поправки на боковий притік води, 4 – розрахунок з врахуванням поправки на боковий притік води в математичній моделі

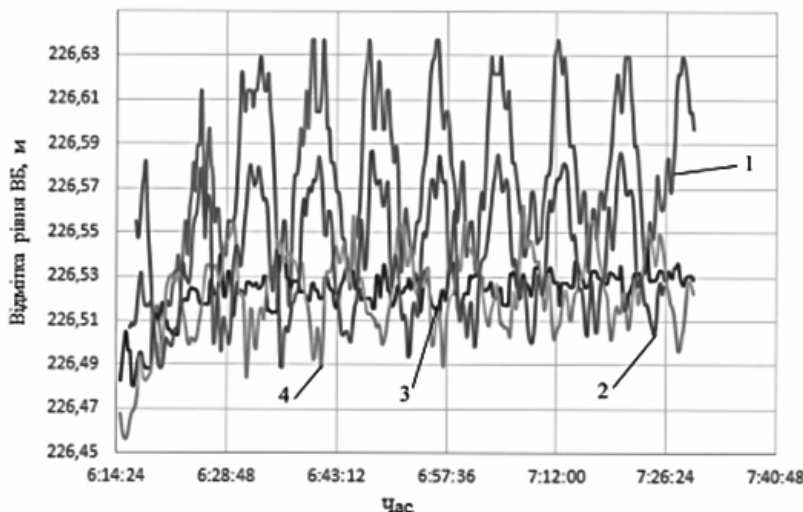


Рис. 3. Графік вимірювань параметрів хвиль переміщення датчиками:

1 – в аванкамері водоприймача, 2 – на ПК63+63;
3 – на ПК52+01; 4 – на ПК38+01

Література

1. Сорокина Н. Л., Кучерявая И. Н. Современные тенденции в развитии мировой гидроэнергетики. *Гідроенергетика України*. 2015. № 1–2. С. 78–81.
2. Ландау Ю. О., Сташук І. В. Значення гідроенергетики в розвитку ОЕС України відповідно до НЕС-2035 і екологічні виклики. *Гідроенергетика України*. 2018. № 1–2. С. 3–6.
3. Рябенко О. А., Осадчий С. Д., Клюха О. О., Тимошук В. С. Особливості роботи ГАЕС в умовах виникнення хвиль переміщення. *Гідроенергетика України*. 2017. № 1–2. С. 45–47.
4. Тихомирова Н. В. ГАЭС на развивающемся энергорынке: инновации и инвестиции. *Гидротехн. стр-во*. 2005. № 6. С. 30–37. <https://doi.org/10.1108/15285810510644875>

Надійшла до редакції 06.06.2019

Влияние волн перемещения на работу верхнего водоема Днестровской гидроаккумулирующей электростанции

А. А. Рябенко, В. С. Тимошук, О. А. Клюха, О. А. Галич, Д. М. Поплавский

Национальный университет водного хозяйства и природопользования,
33028, Украина, г. Ровно, ул. Соборная, 11

Освещается роль гидравлической энергии как надежного источника возобновляемой энергии для обеспечения постоянно растущих потребностей общества. Анализируется неравномерность характера энергоснабжения в течение суток. Подчеркивается роль ГЭС и ГАЭС в регулировании указанной неравномерности при работе объединенной энергосистемы. Показано что пуск, работа, регулировка мощности и остановка агрегатов ГАЭС характеризуются возникновением в аванкамере, верхнем водоеме и отводящем канале неустоявшихся гидравлических режимов потока. Эти режимы сопровождаются образованием волн перемещения, характеристики которых нужно учитывать при проектировании и эксплуатации сооружений станции. Эксплуатация Днестровской ГАЭС подтвердила, что в верхнем водоеме станции при работе её агрегатов в насосном и турбинном режимах образуются волны перемещения. Наличие таких волн существенно влияет на положение отметки гребня ограждающих дамб и устойчивость крепления верхового откоса этих дамб в условиях действия знакопеременных волновых нагрузок. Приводятся результаты натурных (экспериментальных) и теоретических исследований параметров волн перемещения в верхнем водоеме указанной станции. Эти результаты получены для первого этапа строительства Днестровской ГАЭС при наличии в верхнем водоеме временной дамбы, расположенной на ПК 7+00. Натурные измерения были сделаны датчиком давления мембранного типа WEGAWELL 72, который расположен в левом стояке аванкамеры. Показано, что максимальные высоты волн наблюдаются в насосном режиме при остановке агрегата. Теоретические расчеты параметров волн перемещения выполнялись на основе дифференциального уравнения Сен-Венана по двумерной методике. При этом высоту волн определяли с помощью гармонического уравнения сейши для прогрессивной волны. Показано, что для расчетного случая остановки агрегата необходимо учитывать наличие бокового притока воды к основному потоку, который подается агрегатом. Сравнение теоретических и экспериментальных результатов показали их удовлетворительное совпадение.

Ключевые слова: волны перемещения, датчик давления, верхний водоем, укос, ГАЭС.