



**Рябенко О. А., д.т.н., професор, Ключа О. О., к.т.н., доцент, Тимощук В. С., ст. викладач (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне), Осадчий С. Д., перший заступник генерального директора, Крайник В. Я., ГП, Галат Вад. В., ГП (ПАТ «Укргідропроект, м. Харків)**

## **ВПЛИВ ХВИЛЬОВИХ РЕЖИМІВ У ВЕРХНІХ ВОДОЙМАХ ГАЕС НА ЇХ НАДІЙНУ РОБОТУ**

**Висвітлюються функції гідроакумулюючих електростанцій при їх роботі в енергосистемі. Підкреслюється особливо важлива функція цих станцій, що полягає у регулюванні параметрів енергосистеми. Розглядаються неусталені гідравлічні режими, які виникають у верхній водоймі та відвідному каналі ГАЕС при роботі станції. Висвітлюються результати натурних досліджень хвиль переміщення у верхній водоймі Дністровської ГАЕС. Співставлення теоретичних і експериментальних параметрів цих хвиль при роботі агрегатів станції у насосному режимі показало їх задовільну збіжність.**

***Ключові слова:* гідроакумулюючі електростанції, датчики тиску, енергосистема, натурні дослідження, хвилі переміщення, хвильові режими.**

**Вступ.** Постійно зростаючі потреби людства в електричній енергії задовольняються за рахунок теплових, гідравлічних, атомних, сонячних, вітрових електростанцій та інших джерел енергії. За даними Міжнародного енергетичного агентства [1], розподіл світового виробництва електричної енергії між джерелами у 2013 р. характеризується таким чином: ТЕС – 68%, ГЕС – 16%, АЕС – 12%, інші джерела енергії – 4%.

Існуючі тенденції розвитку світової енергетики можна охарактеризувати таким чином. Теплова енергетика використовує невідновлювані види палива (кам'яне вугілля, нафта, газ та ін.), що істотно стримує подальший розвиток цієї галузі. Після масштабних аварій на АЕС Чорнобильській (Україна, 1986 р.) і Фукусіма (Японія, 2011 р.) спостерігається тенденція зменшення виробництва і споживання атомної електричної енергії. Використання нетрадиційних відновлюваних видів енергії (сонячна, вітрова, енергія припливів, біопалива, відходів та ін.) є надзвичайно перспективним. Проте виробництво та-

кої електричної енергії значною мірою залежить від природних факторів і не може забезпечити суспільство електричною енергією відповідно до реального графіка електроспоживання.

**Роль гідроенергетики**, що використовує відновлювану енергію води внаслідок зазначених обставин, суттєво зростає. У 90-і роки світовий приріст потужності гідроелектростанцій становив біля 100 ГВт, а за наступне десятиріччя він збільшився майже вдвоє. У 2014 р. встановлена потужність ГЕС світу досягла значення 1000 ГВт. За прогнозом Всесвітньої енергетичної ради [2], світовий потенціал гідроелектростанцій до 2015 р. може подвоїтися і зрости до 2000 ГВт.

Серед важливих складових гідроенергетики (великі, середні, малі, гідроакумулюючі та інші електростанції) особливу роль відіграють гідравлічні акумулюючі електричні станції (ГАЕС). Ці станції, використовуючи воду у турбінному та насосному режимах, виробляють гостро дефіцитну пікову і напівпікову електричну енергію та споживають дешеву базову енергію. При цьому забезпечується покриття нерівномірного добового і сезонного графіків навантаження енергосистем.

В останні десятиріччя обсяг функцій ГАЕС істотно збільшився [3-5]. Надзвичайно важливою функцією цих станцій стало регулювання параметрів (потужність, частота,  $\cos \varphi$  та ін.) енергосистеми в процесі її роботи. ГАЕС разом з ГЕС є єдиними високоманевреними станціями енергосистеми, які практично миттєво можуть включатися у роботу, ліквідовуючи можливі аварійні і передаварійні ситуації.

У цьому відношенні красномовними є дані про тривалість процесу включення в роботу агрегатів ГЕС, ГАЕС, ТЕС і АЕС. Час набору повної потужності агрегатів ГЕС і ГАЕС після їх пуску становить 1-2 хвилини, а при роботі цих агрегатів у режимах холостого ходу – всього 15-30 секунд. Для порівняння зазначимо, що вказаний час для агрегатів ТЕС становить 90-180 хв, АЕС – 390-660 хв, а в режимі «гарячого» стану для агрегатів ТЕС – 20-30 хв, АЕС – 60 хв. За таких обставин ГАЕС використовують для створення оперативного і аварійного резервів потужності енергосистеми.

Про важливість регульовальної функції ГАЕС може свідчити кількість змін режимів роботи цих станцій. Так ця кількість становить для ГАЕС Дракенберг (ПАР) – 8000, Гільбоа (США) – 6000, Дінорвіг (Англія) – 5000. Число пусків оборотних агрегатів Загорської АЕС досягає 440 в місяць, а в окремі періоди – до 30 пусків за добу (без врахування пусків агрегатів у режимі синхронного компенсатора) [5].

Досвід експлуатації енергетичних систем розвинених країн сві-



ту показує, що для ефективної роботи цих систем доля потужності електричної енергії, що виробляється на ГЕС і ГАЕС, повинна становити більше 15% сумарної електричної потужності вироблюваної на всіх електростанціях країни. Відповідно з цим у багатьох країнах спостерігається інтенсивне будівництво ГЕС і ГАЕС. Характерно, що у 56 країнах гідроелектростанції забезпечують понад 50% виробленої енергії, а у 23 країнах – більше 90% [6]. Важливо підкреслити, що на нинішньому етапі розвитку світової гідроенергетики у багатьох країнах значна частина економічних створів для будівництва великих гідроелектростанцій уже використана.

**Характерною тенденцією розвитку гідроенергетики** за таких умов є будівництво гідроакumuлюючих електростанцій. Наразі кількість працюючих таких станцій у світі становить 350, а з урахуванням ГАЕС, що будуються, проектується і намічені до будівництва, ця кількість оцінюється значенням у 500 станцій [5; 7]. Світовими лідерами в цьому плані є США, Японія, Німеччина, Італія, Франція, Швейцарія, де експлуатується біля 200 ГАЕС.

Нині в Україні працюють Київська (це перша ГАЕС у бувшому СРСР), Ташлицька і Дністровська гідроакumuлюючі електростанції. Наразі в Україні частка електричної енергії ГЕС і ГАЕС становить 10% від установленної потужності та 7% від обсягу вироблюваної енергії.

Оновленою енергетичною стратегією України до 2030 року передбачається модернізація діючих гідроелектростанцій та будівництво нових таких станцій загальною потужністю 5 ГВт. При цьому заплановано у 2015–2020 роках будівництво другої черги Ташлицької та Дністровської ГАЕС, а у 2020–2023 роках введення в експлуатацію чотирьох блоків Канівської ГАЕС. Виконання зазначених планів дасть можливість збільшити частку маневрених потужностей ГЕС і ГАЕС до 16% виробленої енергії.

Однією з багатьох позитивних рис ГАЕС є те, що їхня робота майже не залежить від водності року і гідрологічного режиму річок, на яких розташовані ці станції. Причина такого положення полягає в тому, що, з точки зору використання води у виробничому процесі, ГАЕС працюють у замкненому циклі з оборотним водопостачанням, забираючи воду з нижньої водойми у насосному режимі і повертаючи її назад у турбінному режимі. Така риса істотно підвищує надійність роботи ГАЕС.

**Особливістю гідравлічного режиму роботи ГАЕС** є утворення неусталених режимів водного потоку у верхній водоймі та відповідному каналі станцій під час пуску, зупинки і зміни потужності їх агрегатів.

При цьому формуються хвилі переміщення, характеристики яких (разом з подібними характеристиками вітрових хвиль) необхідно враховувати при визначенні відміток верха огороджуючих споруд верхньої водойми ГАЕС, при виборі типу і розмірів кріплення укосів земляних дамб, а також при виконанні розрахунків міцності та стійкості споруд. Схему накопчення водних хвиль (в тому числі і хвиль переміщення) на похилу поверхню показано на рис. 1.

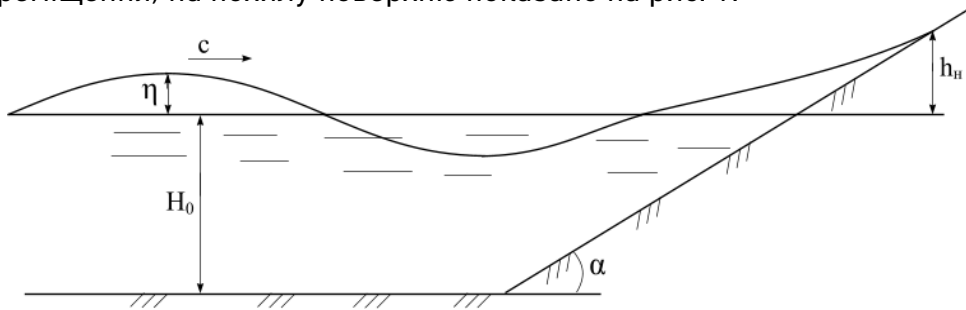


Рис. 1. Схема накопчення водних хвиль на укіс

Існує кілька методик чисельного розрахунку висот хвиль переміщення на етапах їх виникнення та поширення у водоймах ГАЕС. Найбільш загальна математична модель має в основі систему рівнянь Нав'є–Стокса, але її використання має складності, зокрема: по-перше, потрібно мати дуже багато вихідних даних, які в явному вигляді важко описати (особливо граничні умови та врахувати всі сили взаємодії); по-друге, складність реалізації розрахунку, оскільки інші математичні моделі з однаковим порядком точності можна вирішити з меншою затратою часу та зусиль.

**Розрахунки хвиль переміщення** зазвичай виконуються за допомогою математичної моделі для опису течій водного потоку в акваторії водойми в першому наближенні теорії «мілкої води» [8]. Відповідна система диференціальних двовимірних рівнянь Сен-Венана з урахуванням негоризонтальності дна та донного тертя має вигляд:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{\partial Q_1}{\partial x} - \frac{\partial Q_2}{\partial y}, \quad (1)$$

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

$$\frac{\partial Q_2}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q_1 Q_2}{h} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{Q_2^2}{h} \right) - gh \frac{\partial (h+Z)}{\partial y} + T_2, \quad (3)$$



де  $t$  – час, с;  $x, y$  – просторові координати;  $h$  – глибина води, м;  $Q_1, Q_2$  – витрати по осям  $x$  та  $y$ , м<sup>3</sup>/с;  $Z$  – відмітка дна, м;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $T_1, T_2$  – донне тертя по осям  $x$  та  $y$ .

Донне тертя задається формулою

$$T_i = \frac{gQ_i \sqrt{Q_1^2 + Q_2^2}}{(C \times h)^2}, \quad i = 1, 2, \quad (4)$$

де  $\bar{C}$  – коефіцієнт Шезі, який визначається за модифікованою формулою Маннінга.

При проведенні натурних досліджень гідравлічних режимів роботи верхньої водойми Дністровської ГАЕС були задіяні датчик № 1 типу VEGAWELL72 біля лівого стояка і датчики № 2-4 типу 4500S-350kPa (рис. 2).

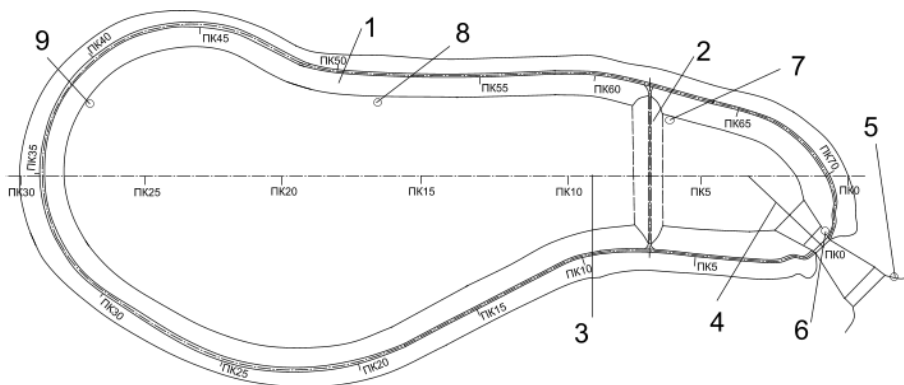


Рис. 2. Схема розташування датчиків тиску у верхній водоймі Дністровської ГАЕС: 1 – основна огорожувальна дамба; 2 – тимчасова дамба на ПК-7; 3 – вісь водойми; 4 – вісь водоприймача; 5 – місце розміщення датчика тиску в нижньому б'єфі типу VEGAWELL72; 6 – місце розміщення датчика тиску в аванкамері водоприймача (датчик № 1); 7 – місце розташування датчика тиску на ПК63 +60 (датчик № 2); 8 – місце розташування датчика тиску на ПК52+01 (датчик № 3); 9 – місце розташування датчика тиску на ПК38+01 (датчик № 4)

**Вимірювання в натурних дослідженнях** (рис. 3, 4) проводилися в реальному часі. Час синхронізується з пультом управління і вимірами, які проводяться іншими датчиками. Запис даних з датчиків тиску 4500S-350kPa виконується за допомогою реєстратора даних Campbell Scientific CR1000. Отримані дані натурних досліджень перераховуються за допомогою тарованого листа з інструкції датчиків в позначки рівнів води за формулою

$$P=G(R1-R0)+K(T1-T0), \quad (5)$$

де  $G$  – лінійний коефіцієнт,  $K$  – поправка на температуру,  $R1$  – отримане значення в лінійних одиницях,  $R0$  – заводський нуль датчика тиску,  $T1$  – температура отримана при вимірюванні датчиком,  $T0$  – температура відліку тарування виробника. Кожен датчик має власний тарувальний лист.

Під час пуску агрегату в насосному режимі роботи максимальна висота хвиль складала 17,35 см. Досягши кінця водойми, висота хвиль складала до 11 см.

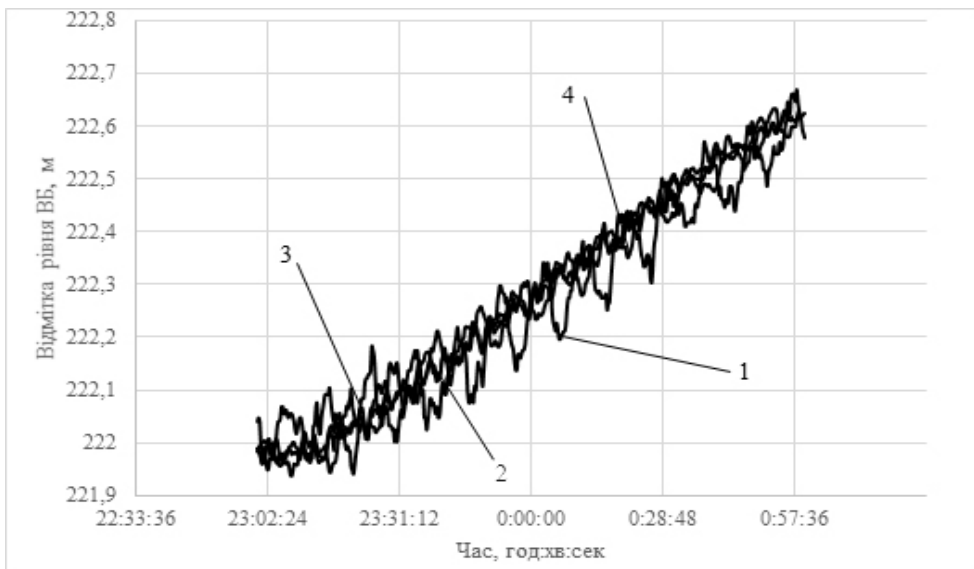


Рис. 3. Графік вимірювань рівнів води у верхньому б'єфі під час пуску другого агрегату в насосному режимі датчиками № 1-№ 4: 1 – значення вимірювання датчиком № 1 в аванкамері водоприймача; 2 – значення вимірювання датчиком № 2 на ПК63+60; 3 – значення вимірювання датчиком № 3 на ПК52+01; 4 – значення вимірювання датчиком № 4 на ПК38+01

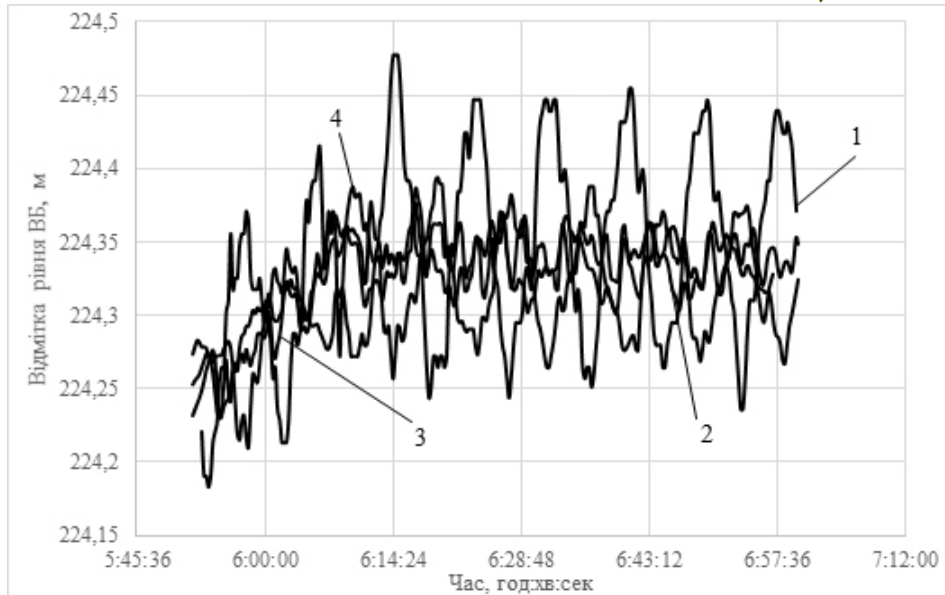


Рис. 4. Графік вимірювань рівні води у верхньому б'єфі під час зупинки другого агрегату в насосному режимі датчиками № 1-№ 4: 1 – значення виміряні датчиком № 1 в аванкамері водоприймача; 2 – значення виміряні датчиком № 2 на ПК63+60; 3 – значення виміряні датчиком № 3 на ПК52+01; 4 – значення виміряні датчиком № 4 на ПК38+01

Хвилі максимальної висоти почали утворюватися після зупинки агрегату. Максимальна висота хвиль склала майже 21,5 см. Досягши кінця водойми, значення висот утворених хвиль доходило до 14 см.

Порівняння даних натурних досліджень хвиль переміщення при роботі агрегатів Дністровської ГАЕС у насосному режимі з теоретичними результатами, отриманими на основі запропонованої математичної моделі, виявило їх задовільну збіжність.

### Висновки

1. На нинішньому етапі розвитку світової енергетики характерною тенденцією є широке використання гідроакумулюючих електростанцій.

2. Натурні дослідження хвильових режимів у верхній водоймі Дністровської ГАЕС з використанням сучасної КВА дали важливий фактичний матеріал для розробки нових і вдосконалення існуючих методик розрахунків характеристик таких режимів.

3. Пропонована методика розрахунків параметрів хвиль переміщення, яка оснований на представленій математичній моделі таких хвиль, дала задовільні результати.

1. Key world energy statistics. International Energy Agency. Paris, 2013. URL: [http // www.iea.org](http://www.iea.org). (дата звернення: 26.01.2018). 2. World energy resources:

charting the upsurge in hydropower development. World Energy Council, 2015. URL: <http://www.worldenergy.org> (дата звернення: 26.01.2018). 3. Рябенко О. А., Осадчий С. Д., Ключа О. О., Тимощук В. С. Особливості роботи ГАЕС в умовах виникнення хвиль переміщення. *Гідроенергетика України*. 2017. № 1-2. С. 45–47. 4. Елистратов В. В., Кудряшева И. Г., Мирошникова Ю. А. Выбор режимных параметров ГАЭС с учетом особенностей их работы в энергосистеме. *Гидротехническое строительство*. 2014. № 11. С. 22–27. 5. Тихомирова Н. В. ГАЭС на развивающемся энергорынке инновации и инвестиции. *Гидротехническое строительство*. 2005. № 6. С. 30–37. 6. Кучерява І. М., Сорокіна Н. Л. Розвиток гідроенергетики світу на сучасному етапі. *Гідроенергетика України*. 2008. № 1. С. 45–51. 7. Ландау Ю. А. Развитие атомной энергетики и ГАЭС. *Гідроенергетика України*. 2006. № 4. С. 18–22. 8. Рябенко О. А., Тимощук В. С., Тимощук І. С. Математичне моделювання хвиль переміщення під час пуску та зупинки агрегатів ГАЕС в насосному режимі. *Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні* : IX Міжнародна НТК. Львів, 2017. С. 240–244.

## REFERENCES:

1. Key world energy statistics. International Energy Agency. Paris, 2013. URL: [http // www.iea.org](http://www.iea.org). (data zvernennia: 26.01.2018). 2. World energy resources: charting the upsurge in hydropower development. World Energy Council, 2015. URL: <http://www.worldenergy.org> (data zvernennia: 26.01.2018). 3. Riabenko O. A., Osadchyi S. D., Kliukha O. O., Tymoshchuk V. S. Osoblyvosti roboty HAES v umovakh vynykennia khvyl peremishchennia. *Hidroenerhetyka Ukrainy*. 2017. № 1-2. S. 45–47. 4. Elistratov V. V., Kudriasheva I. H., Miroshnikova Yu. A. Vybora rezhimnykh parametrov HAES s uchetom osobennosti ikh raboty v enerhosisteme. *Hidrotekhnicheskoe stroitelstvo*. 2014. № 11. S. 22–27. 5. Tikhomirova N. V. HAES na razvivaiushchemsia enerhorynke innovatsii i investitsii. *Hidrotekhnicheskoe stroitelstvo*. 2005. № 6. S. 30–37. 6. Kucheriava I. M., Sorokina N. L. Rozvytok hidroenerhetyky svitu na suchasnomu etapi. *Hidroenerhetyka Ukrainy*. 2008. № 1. S. 45–51. 7. Landau Yu. A. Razvitie atomnoi enerhetiki i HAES. *Hidroenerhetyka Ukrainy*. 2006. № 4. S. 18–22. 8. Riabenko O. A., Tymoshchuk V. S., Tymoshchuk I. S. Matematychno modeliuвання khvyl peremishchennia pid chas pusku ta zupynky ahrehativ HAES v nasosnomu rezhymi. *Netradytsiini i ponovliuvani dzherela enerhii yak alternatyvni pervynnym dzherelam enerhii v rehioni* : IX Mizhnarodna NTK. Lviv, 2017. S. 240–244.

Рецензент: к.т.н., доцент Шинкарук Л. А. (НУВГП)

---

**Riabenko O. A., Doctor of Engineering, Professor, Kliukha O. O., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor, Tymoshchuk V. S., Senior Lecture** (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne), **Osadchyi S. D., First Deputy Director General, Krainyk V. Ya., Chief Designer, Halat Vad. V.,**





**Chief Designer** (PRJSC «Ukrhydroproject, Kharkiv)

## **INFLUENCE OF WAVY REGIMS IN UPPER RESERVOIRS OF HPSPP ON THEIR SAFE OPERATIONG**

The functions of hydroelectric pumped storage power plants during their operating in energy system are shown. The article emphasizes peculiarly important function of these plants, that is regulation parameters of energy system. The unsteady hydraulic regimes that occur in upper reservoir and tailrace canal during plant operating is considered. The results of field observation of translation waves in the upper reservoir of Dnistrovska HPSPP are given. The comparison of theoretical and experimental parameters of these waves during aggregates operating of plant in pumping regime showed their satisfactory convergence.

**Keywords:** hydroelectric pumped storage power plants, pressure sensor, energy system, field observation, translational waves, wavy regimes.

---

**Рябенко А. А., д.т.н., профессор, Ключа О. А., к.т.н., доцент, Тимощук В. С., ст. преподаватель** (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно), **Осадчий С. Д., первый заместитель генерального директора, Крайник В. Я., ГИП, Галат Вад. В., ГИП** (ПАТ «Укргідропроект, г. Харьков)

## **ВЛИЯНИЕ ВОЛНОВЫХ РЕЖИМОВ У ВЕРХНИХ БЬЕФАХ ГАЭС НА ИХ НАДЕЖНУЮ РАБОТУ**

Освещаются функции гидроаккумулирующих электростанций при их работе в энергосистеме. Подчеркивается особенно важная функция этих станций, состоящая в регулировании параметров энергосистемы. Рассматриваются неустановившиеся гидравлические режимы, возникающие у верхнем водоеме и отводящем канале ГАЭС при работе станции. Освещаются результаты натурных исследований волн перемещения у верхнем водоеме Днестровской ГАЭС. Сопоставление теоретических и экспериментальных параметров этих волн при работе агрегатов станции в насосном режиме показало их удовлетворительное совпадение.

**Ключевые слова:** гидроаккумулирующие электростанции, волновые режимы, волны перемещения, датчики давления, натурные исследования, енергосистема.

---