

ГІДРОТЕХНІКА

УДК 621.311.21:532.537

Рябенко О.А., д.т.н., професор, Тимошук В.С., аспірант (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

РОЗРАХУНКИ НЕУСТАЛЕНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ВЕРХНЬОГО БАСЕЙНУ ГАЕС

В статті розглянуті методики та наведені результати чисельного моделювання для визначення відміток вільної поверхні та поля швидкостей верхнього басейну при роботі ГАЕС. Обґрунтована доцільність та актуальність проведення натурних досліджень для вдосконалення існуючих методик.

Ключові слова: вільна поверхня рідини, гідроакumuлююча електростанція (ГАЕС), неусталені режими руху рідини, поле швидкостей, хвилі переміщення.

В статье рассмотрены методики и приведены результаты численного моделирования для определения отметок свободной поверхности и поля скоростей верхнего бассейна при работе ГАЭС. Обоснована целесообразность и актуальность проведения натурных исследований для совершенствования существующих методик.

Ключевые слова: волны перемещения, гидроаккумулялирующая электростанция (ГАЭС), неустановившися режими движения жидкости, поле скоростей, свободная поверхность жидкости.

The article discussed the methods and results of numerical simulations to determine the marks of the free surface and the area velocity of the upper reservoir in PSP operation. The expedience and actuality of field research to improve the existing methods are substantiated.

Keywords: area velocity, free water surface, pumped storage power plant (PSP), unstable conditions flow, waves movement.

Верхні водойми гідроакumuлюючих електростанцій мають два характерні режими роботи: насосний (наповнення верхньої водойми в період провалу графіка навантаження енергосистеми) та турбінний (спрацювання водойми в період піків навантаження). Специфічною особливістю роботи водойм ГАЕС, в порівнянні з водосховищами ГЕС, є більш напружений режим використання внаслідок регулярної періодичної зміни основних гідрофізичних полів (рівень поверхні та швидкість течії) при зміні режимів роботи. Тому, як на етапі проектування об'єкту, так і на етапах його будівництва та експлуатації дуже важливим є розуміння динаміки процесів, що відбуваються у водой-

мі, особливо їх критичних режимів з можливими катастрофічними наслідками: переповнення водойми, перелив води через огороджуванні дамби внаслідок хвильових процесів, розмив дна і т.п.

Основною задачею комп'ютерного моделювання є визначення відміток вільної поверхні та поля швидкостей. Визначення вказаних полів виконується в ході сценаріїв розрахунків, що ілюструють різні режими роботи ГАЕС з урахуванням варіювання основних параметрів енергетичних установок, а також зміна геометрії водойми, пов'язана з вибором в ході проектування оптимальних форм огорожувальних конструкцій та рельєфу дна.

Даною проблемою займалися: Чугаєв Р.Р., Барахнин В.Б., Давлетшин В.Х., Хом'як Р.В., Беліков В.В.[1-4] та інші, які створили методики розрахунків, використовуючи результати модельних досліджень, та намагалися в певному наближенні чисельно розв'язати рівняння Сен-Венана.

Метою даної статті є чисельна перевірка назначених відміток гребеня тимчасової дамби першої черги верхнього водосховища при роботі одного агрегату Дністровської ГАЕС, використовуючи існуючі методики розрахунків гідравлічних режимів.

Методики чисельних розрахунків обрисів вільної поверхні потоку основані на вирішенні одновимірних та двохвимірних рівнянь Сен-Венана, трьохвимірних рівнянь Рейнольдса в гідростатичному наближенні. При вирішенні задачі використовуються також 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 конкретного водоймища, велику кількість інших діючих факторів і поправочних коефіцієнтів.

Вибір математичної моделі для опису конкретного фізичного явища потребує попереднього аналізу та врахування характерних параметрів цього явища та виявлення пріоритетного значення їх. Відношення характеристик розмірів водосховища дає можливість вивчати гідрофізичні процеси в ньому у термінах теорії мілкої води, рівняння якої мають вигляд[1, 5]:

$$\begin{cases} u_t + uu_x + vv_y + g\eta_x = f_1, \\ v_t + uv_x + vv_y + g\eta_y = f_2, \\ \eta_t + (uh)_x + (vh)_{y_x} = f_3, \end{cases} \quad (1)$$

де u, v – компоненти горизонтальної швидкості, $h = H + \eta$ – повна глибина, H – глибина незбуреного шару рідини, η – зміщення вільної поверхні, g – прискорення вільного падіння, f_i – значення, що описують дію зовнішніх факторів (сили Кориоліса, донного та вітрового тертя) і знаходяться за формулами:

$$\begin{aligned}
 f_1 &= lv - g \frac{u\sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 h} + v(u_{xx} + u_{yy}) + f^{(x)}, \\
 f_2 &= -lu - g \frac{u\sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 h} + v(v_{xx} + v_{yy}) + f^{(y)},
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

де $l = 2\omega \sin \varphi$ – кутова швидкість обертання Землі; φ – географічна широта; C – коефіцієнт Шезі, що визначається з формули Майнінга $C = \frac{R^{1/6}}{n}$; R – гідравлічний радіус, який приймається для відкритого широкого русла рівним глибині H ; $f^{(x)}, f^{(y)}$ – додатки, що враховують ефекти вітрового тертя на вільній поверхні; f_3 – права частина рівняння нерозривності, що відповідає за зовнішнє джерело маси.

Існує також друга форма запису цих рівнянь, яку частіше використовують при розв’язку задач, що пов’язані з розрахунком полів розриву [2, 5]:

$$W_i + F_x + G_y = E, \tag{3}$$

де $W = \{U, V, h\}$,

$$\begin{aligned}
 F &= \left\{ \frac{U^2}{h} + g \frac{h^2}{2}, \frac{UV}{h}, U \right\}, \quad G = \left\{ \frac{UV}{h}, \frac{V^2}{h} + g \frac{h^2}{2}, V \right\}, \\
 E &= \left\{ ghH_x + lV - g \frac{U(U^2 + V^2)}{C^2 h^2} + A_1, ghH_y - lU - g \frac{V(U^2 + V^2)}{C^2 h^2} + A_2, 0 \right\}, \\
 A &= \{A_1, A_2\} = \nu \Delta U - \nu U \frac{\Delta h}{h} - \nu \left(\nabla \frac{U}{h} \right) \cdot \nabla h, \quad U = \{U, V\}.
 \end{aligned}$$

Бокова межа $\Gamma(t)$ області водойми $\Omega(t)$ складається з двох частин, одна з яких відповідає водоприймачу $\Gamma_1(t)$, і на цій ділянці задається витрата $Q(t)$, що залежить від часу коли працює певна кількість агрегатів, другий фрагмент межі $\Gamma_2(t)$ відповідає огорожувальній дамбі, що залежно від детальності моделювання може описуватись як вертикальною, так і нахиленою під кутом поверхнею, тоді можна розглядати розв’язок в області з нерухомою межею, що рухається з швидкістю, рівній швидкості частинок рідини біля неї і на цій межі створюється умова рівності нулю повної глибини.

Геометрія верхньої водойми ГАЕС (рис. 1) характеризується значним перевищенням її горизонтальних розмірів над вертикальними, витягнутість

вздовж одного із горизонтальних напрямків, малими змінами поля глибин. При виконанні розрахунків водойму розбивають на окремі ділянки. Іншим важливим параметром розрахунків є час процесу, який задається тривалістю наповнення та спрацювання водойми. При цьому важливо також враховувати геометрію огорожувальної дамби та динаміку зміни вільної поверхні.

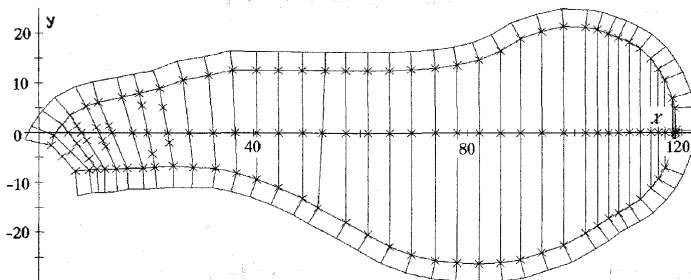


Рис. 1. Планова геометрія верхньої водойми ГАЕС

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 виді, 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[2, 5]:

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial \eta}{\partial x} + g \frac{Q|Q|}{C^2 AR} - vq \cos \varphi = 0, \\ \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q, \end{cases} \quad (4)$$

де $A = \int_B h' dy$ – площа поперечного перерізу, $Q = \int_B h' \bar{u} dy = A\bar{u}$ – витрата, B – ширина живого перерізу русла, $\alpha = \frac{A}{Q^2} \int_A u^2 dA$ – коефіцієнт розподілу швидкості (коефіцієнт Буссінеска).

В більш повній постановці, задачу можна розглядати у 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.

Одним із основних питань чисельних розрахунків вільної поверхні потоку у верхній водоймі ГАЕС є забезпечення швидкодії алгоритмів разом з їхньою високою точністю, що дозволяє адекватно проводити повільні процеси впродовж довгого часу. У зв'язку з цим потрібно використовувати для апроксимації рівнянь та їх модифікацій неявні кінцево-різницеви схеми на рухомих адаптативних сітках. Використання двовимірних неявних схем потребують використання підходів, пов'язаних з методом розщеплення на ряд одномірних задач із збереженням переваг простоти реалізації. Найпопулярніші програми для виконання таких розрахунків є HEC-RAS, FLOW-3D, MIKE та інші.

HEC-RAS – це вбудована система програмного забезпечення, розроблена для діалогового використання в багатоплановій сфері [6]. Система складається з трьох одномірних гідравлічних компонентів аналізу для моделювання усталених водних поверхонь потоку, неусталеного потоку рідини, руху твердих частинок в потоці та розрахунків розмиву. Всі ці компоненти використовують загальне представлення даних у всіх гідравлічних та геометричних програмах моделювання. В основі розрахунку є вирішення рівняння Сен-Венана, де енергетичні втрати оцінюються тертям (рівняння Маннінга) та стисненням потоку. Можливі розрахунки ситуацій, де водний потік і його поверхня є швидкозмінною.

Коротко розглянемо саму програму. При запуску програми з'явиться діалогове вікно, яке представлено на рис. 2.

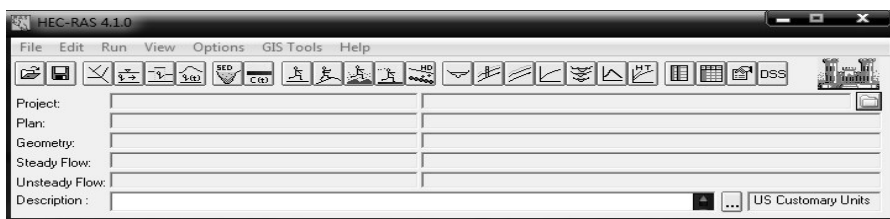


Рис. 2. Діалогове вікно програми

Як видно з рисунку, зверху знаходиться панель управління файлами проекту. На панелі інструментів знаходяться в лівій частині елементи для задання параметрів русла та граничних умов руху рідини; в правій частині знаходяться елементи виведення графічного матеріалу розрахунків.

Для роботи програми потрібно створити файли, які будуть містити план місцевості, геометрію самої місцевості у вигляді поперечників, задати режим

течії чи режим роботи русла та граничні умови. Також можливе введення даних про швидкості вітру, температури води, відомості про бокову приточність, замуленість, перенос твердих частинок, можливі перешкоди на шляху потоку (мости, греблі, дамби, насосні станції та інше). На рис. 3 наведено принципове діалогове вікно введення координат поперечників.

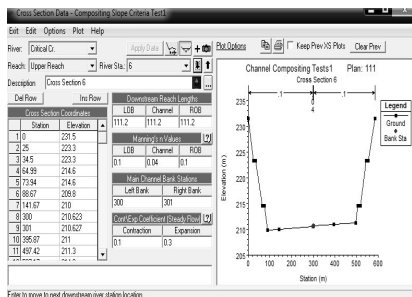


Рис. 3. Діалогове вікно задання поперечників

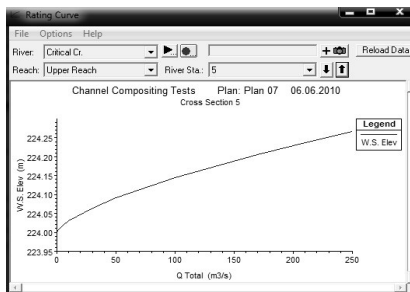


Рис. 4. Вихідне вікно залежності H від Q

У верхній частині вікна знаходяться вказівки стосовно номеру поперечника, в лівій – координати поперечника по осям в метрах, в середній – відстань до наступного поперечника, коефіцієнт шорсткості в центрі поперечника та по його краях, центрування поперечника вводиться в метрах відносно початку координат, у нашому випадку центрування поперечників іде по вісі споруд та вісі верхнього басейну. Додатково вводиться коефіцієнт можливості нерівномірного руху потоку, в нашому випадку в аванкамері нерівномірність потоку буде високою, а біля тимчасової дамби потік рахуємо рівномірний. На рис. 4 зображено принципове вікно розрахунків значень рівнів води в поперечнику при певній витраті.

В змодельованій нами ситуації бралися натурні значення розмірів існуючого на даний час верхньої водойми Дністровської ГАЕС з проміжною дамбою біля 7 пікета, нормальним підпірним рівнем на відмітці 222,5 м та розрахунковій витраті одного агрегату 251 м³/с. Згідно з даною програмою в кінцевому часі подачі витрати в початковому перерізі спостерігається хвильове перевищення рівня води на 0,31 м в порівнянні з кінцевим перерізом, це пов'язано з добіганням хвилі, що утворюється внаслідок роботи станції в насосному режимі. При цьому висота накопчення хвилі на дамбу була рівною 0,53 м. В порівнянні з відміткою гребеня дамби, яка рівна рівна 224 м, можна зробити висновок, що при накопченні хвилі на дамбу, переливу води через гребінь не буде.

В умовах інтенсивного будівництва ГАЕС питання розрахунків обрисів вільної поверхні потоку у верхній водоймі та відвідному руслі при роботі цих станцій в насосному і турбінному режимах є досить актуальним, оскільки існуючі моделі в більшості випадків справджуються на певних проміжках і є

непримінимими для повного опису явищ та процесів. Для підвищення надійності таких розрахунків та проектування відповідних споруд особливого значення набуває дослідження основних характеристик потоку в насосному і турбінному режимах роботи ГАЕС на діючих об'єктах в натурних умовах. Слід також зазначити їх важливість, оскільки вони є основним орієнтиром для підтвердження математичних моделей та їх перевірки.

1. Чугаев Р. Р. Гидравлика: учебник для вузов. – 4-е изд. доп. и перераб. – Л. : Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. – 672 с. **2.** Барахнин В. Б., Хакимянов Г. С., Чубаров Л. Б., Шкуропацкий Д. А. Некоторые проблемы численного моделирования волновых режимов в огражденных акваториях // Вычислительные технологии. – 1996. – №2, том.1. – С. 3-26. **3.** Давлетшин В. Х., Хом'як Р. В. Исследование гидравлического режима потоков в верхнем водохранилище Днестровской ГАЭС // Гидроэнергетика Украины. – 2006. – №3. – С. 24-29. **4.** Беликов В. В., Ковалев С. В. Численные исследования при решении гидравлических задач // Гидротехническое строительство. – 2009. – №8. – С. 61-67. **5.** Эббот М. Б. Численная гидравлика. Гидравлика открытого потока. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 272 с. **6.** HEC-RAS Hydraulic Reference Manual Version 4.0 // US Army Corps of Engineering, 2008. – 746 p.

Рецензент: д.т.н., професор Хлапук М.М. (НУВГП)