

Математичне моделювання гідравлічних режимів водного потоку низьконапірних ГЕС з використанням рівнянь Сен-Венана

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.029>

Олександр Рябенко

Національний університет водного господарства та природокористування
Рівне, Україна
o.a.riabenco@nuwm.edu.ua

Павло Попруга

Національний університет водного господарства та природокористування
Рівне, Україна
p.v.popruha@nuwm.edu.ua

Поплавський Дмитро

Науково-дослідний відділ
ТОВ «ГІДРОТЕХПРОЕКТ»
Харків, Україна
dm.m.poplavskiy@gmail.com

Анотація – У роботі розглянуто використання диференціального рівняння Сен-Венана при розрахунку гідравлічних режимів водного потоку низьконапірних ГЕС. Наведено математичну модель, що базується на інтегруванні рівнянь Сен-Венана по явній кінцево-різницевої схемі з урахуванням умови стійкості по Куранту. Показано результати розрахунку гідравлічних режимів верхнього б'єфу Нижньодніпровської ГЕС.

Ключові слова – гідроелектростанція; рівняння Сен-Венана; гідравлічний режим; 2-D моделювання; пропускна спроможність.

I. ВСТУП

Під час проектування та експлуатації гідровузлів (ГЕС, ГАЕС) необхідно проводити велику кількість заходів, що дозволять забезпечити нормальний рівень безпеки та надійності всіх гідротехнічних та гідроенергетичних споруд станції. До такого роду заходів можна віднести різного роду гідравлічні розрахунки, які, як правило, проводяться на етапі проектування. Неточності та помилки при проведенні таких розрахунків можуть привести до неоптимальних проектних рішень і як наслідок майбутніх руйнувань та аварій наведених споруд [1].

Найбільш складними, і при цьому найбільш важливими, гідравлічними розрахунками є встановлення гідравлічних режимів роботи верхнього та нижнього б'єфів гідровузла, особливо низьконапірних. Особливість низьконапірних ГЕС є відносно малий інтервал зміни вихідних основних гідравлічних параметрів (рівні в ВБ та НБ, витрати тощо), що унеможливило використання більшості класичних способів боротьби з негативними наслідками неоптимальних режимів роботи б'єфів. Провівши аналіз існуючих підходів до вказаних розрахунків [2-4] можна зробити висновок, що вони мають відносно вузьку сферу застосування, оскільки базуються на конкретних вихідних даних,

компоновки гідровузла, наближеннях тощо. Отримані результати згідно вказаних методів прийнятних результатів, як правило, виключно для певного або типового гідровузла.

Відповідно, в сучасній практиці проектування ГЕС та ГАЕС постає гостра необхідність в створенні універсальної математичної моделі розрахунку гідравлічних режимів роботи верхнього та нижнього б'єфів гідровузлів.

Мета роботи — висвітлення сучасного апробованого підходу до проведення розрахунків встановлення гідравлічних режимів в верхньому та нижньому б'єфах низьконапірних гідровузлів за рахунок проведення двохмірного (2-D) комп'ютерного моделювання.

II. ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

Для опису гідравлічного режиму водного потоку в верхньому або нижньому б'єфах гідровузлів доцільно використовувати систему диференціальних двовимірних рівнянь Сен-Венана з урахуванням негоризонтальності дна і донного тертя, що реалізована у вигляді:

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

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

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

де t – час; x, y – просторові координати; h – глибина води; Q_1, Q_2 – витрати по осях x та y ; Z – відмітка дна; T_1, T_2 – донне тертя по осях x та y .

Вперше у вітчизняній практиці проектування гідровузлів диференціальні рівняння Сен-Венана для проведення наведених розрахунків були використані головним спеціалістом науково-дослідного відділу ПРАТ «УКРГІДРОПРОЕКТ» Павловим Є.Ф. В подальшому запропонована ним математична модель постійно удосконалювалась та використовувалася під його керівництвом при проектуванні Дніпровського та Дністровського каскадів ГЕС та ГАЕС, ряд закордонних гідровузлів (Хідаська ГЕС, Ефіопія; Гродненська ГЕС, Білорусія; ГЕС Мткварі, Грузія; ГЕС Кан Дон та Нам Чіен, В'єтнам).

Як початкові умови системи рівнянь (1) – (3) задавалися значення рівня $H_0(x, y)$ та вектори швидкості $\vec{V}_0(x, y)$, $\vec{V}_0 = (u, v)$ у початковий момент часу. На межі області, в якій проводиться чисельне рішення задачі, в процесі математичного моделювання, ставиться умова не протікання $\vec{V} \times \vec{n} = 0$ (\vec{n} – одиничний вектор зовнішньої нормалі до границі), що відповідає жорсткій стінці, або умова втікання – витікання рідини. При втіканні рідини повинна спостерігатися умова – $\vec{V} \times \vec{n} < 0$ з докритичною швидкістю $|\vec{V} \times \vec{n}| < \dot{C}$ (\dot{C} – швидкість поширення хвилі збурення) на границі задається або вектором витрати \vec{Q} або глибиною h та проекцією $\vec{Q} \times \vec{l}$ вектору \vec{Q} до одиничного вектору \vec{l} , що дотичний до границі. При втіканні з надкритичною швидкістю $|\vec{V} \times \vec{n}| > \dot{C}$ на границі задається і вектор витрати \vec{Q} і глибина h . При витіканні $\vec{V} \times \vec{n} > 0$ з докритичною швидкістю на границі задається або $\vec{Q} \times \vec{n}$ – проекція витрати на нормаль або глибина h . При витіканні зі надкритичною швидкістю на границі ніяких умов не ставиться.

Інтегрування рівнянь (1) – (3) може проводитися з використанням програмних комплексів Mike, HEC-RAS тощо [5]. При цьому розрахунок проводиться за явною звичайно-різницевою схемою, внаслідок чого крок за часом у процесі рахунку визначається з умови стійкості Куранта. Необхідно додатково відмітити, що існує умова існування розрахунку системи рівнянь (1) – (3) математичного моделювання в плані (2-D) – коли співвідношення повздовжніх та поперечних розмірів б'єфу не перевищує відношення:

$$B/h > 5, \quad (4)$$

де B – ширина водойми по урізу води; h – глибина води. Якщо умова (4) порушується лише в кількох місцях, то застосування рівнянь (1) – (3) допустимо. При цьому картина течій буде правдоподібною лише на відстані $(10 \div 15)h$ від місця, де порушена умова (4).

Наведена математична модель дозволяє проводити наступні розрахунки:

- рівневого та швидкісного режимів, а також профілів вільної поверхні водного потоку для течії, що встановилася (квазіустановилася);

- моделювання нестационарних течій
- моделювання проривної хвилі;
- моделювання динаміки спрацювання та заповнення, а також трансформації б'єфів;
- моделювання гідравлічних режимів у б'єфах, пов'язаних із добовим регулюванням, а також пуском та зупинкою гідроагрегатів станцій тощо.

Наведена математична модель була успішно використана для повторного гідравлічного розрахунку при зміні умов підходу потоку до водозливної греблі в верхньому б'єфі Нижньодністровської ГЕС [6] і впливу їх на пропускну здатність наведеної споруди. Розрахунок обумовлений наявністю у верхньому б'єфі Нижньодністровської ГЕС підводних штучних "островів", що утворилися в процесі будівництва гідровузла та раніше в проєкті не враховувалися при гідравлічному моделюванні.

Попередньо було проведено промірювання рельєфу дна акваторії верхнього б'єфу Нижньодністровської ГЕС [7], що слугували вихідними даними для гідравлічного розрахунку (зображено на рис. 1).



Рисунок 1. Результати промірювання рельєфу дна акваторії верхнього б'єфу Нижньодністровської ГЕС

Для виконання моделювання намічалася досліджувана ділянка акваторії верхнього б'єфа з ізобатами, виділяються розрахункові зони з морфометричними характеристиками. В подальшому була створена 2-D модель верхнього б'єфу – для чого досліджувана зона акваторії б'єфа розбивається в плані на прямокутну сітку з характерними стільниковими осередками по ΔX і ΔY . Сітка забезпечує розрахункову схематизацію водойми для моделі з точністю до постійних кроків сітки. Для кожного стільникового осередку сітки в матрицю математичної моделі вводяться вихідні початкові значення рівнів води, глибин, векторів швидкостей

тощо. Розрахунок проводився для пропуску розрахункового паводку ($Q_{0,1\%} = 8320 \text{ м}^3/\text{с}$ при РВБ = +77,800 м), а також для перевірного ($Q_{0,01\%} = 13260 \text{ м}^3/\text{с}$ при РВБ = +82,000 м).

За результатами математичного моделювання було отримано:

- плани течії у векторному відображенні, у процесі наповнення б'єфа для характерного гідрографа пропуску розрахункового і перевірного паводків;
- хронограм зміни середніх по глибині (або середніх на вертикалях) у розрахункових стільникових осередках) швидкостей у залежності від рівнів води при наповненні водойми;
- планових епюр максимальних, середніх по вертикалі, швидкостей потоку води в акваторії верхнього б'єфа на характерні проміжки часу;
- ізоліній максимальних, середніх по глибині, швидкостей у досліджуваній акваторії при наповненні б'єфа.

Результати досліджень частково представлені в таблиці 1, де проведено порівняння отриманих результатів з даними, що були отримані при проведенні гідравлічних розрахунків під час проєктування гідровузла (1981-1984 рр.), а також на рисунках 2-4.

ТАБЛИЦЯ 1. Порівняння результатів розрахунків

Параметр	Проектний варіант (без штучних «островів»)	Сучасний розрахунок (з уточненим рельєфом дна та штучними «островами»)
Розрахунковий паводок ($Q_{0,1\%} = 8320 \text{ м}^3/\text{с}$ при РВБ = +77,800 м)		
Площа живого перерізу в ВБ $\omega_1, \text{м}^2$	8 570	8 191
Площа живого перерізу на вході перед бичками $\omega_2, \text{м}^2$	2 507	
Швидкість потоку (середня по перерізу) в ВБ $V_1, \text{м/с}$	0,97	1,02
Швидкість потоку (середня по перерізу) на вході перед бичками $V_2, \text{м/с}$	3,32	3,32
Величина гідравлічних втрат напорів $h_\xi = 0,4 \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g}, \text{м}$	0,21	0,20
Перевірочний паводок ($Q_{0,01\%} = 13260 \text{ м}^3/\text{с}$ при РВБ = +82,000 м)		
Площа живого перерізу в ВБ $\omega_1, \text{м}^2$	11 762	11 428
Площа живого перерізу на вході перед бичками $\omega_2, \text{м}^2$	3 162	
Швидкість потоку (середня по перерізу) в ВБ $V_1, \text{м/с}$	1,13	1,16
Швидкість потоку (середня по перерізу) на вході перед бичками $V_2, \text{м/с}$	4,19	4,19
Величина гідравлічних втрат напорів $h_\xi = 0,4 \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g}, \text{м}$	0,33	0,33

Аналіз отриманих результатів показав, що впливу підводних штучних «островів» на ступінь стиснення потоку (див. таблицю 1) є незначним (останні зменшують живий переріз на 4,4% при пропуску розрахункового паводку і на 2,8% при пропуску перевірного паводків). Слід зазначити, що вказані вище величини стиснення живого перерізу знаходяться в межах точності результатів експериментального фізичного моделювання, і тому, ймовірно, не дали б кількісних результатів на фізичній моделі. Тому чисельне математичне моделювання у даних конкретних умовах є кращим.

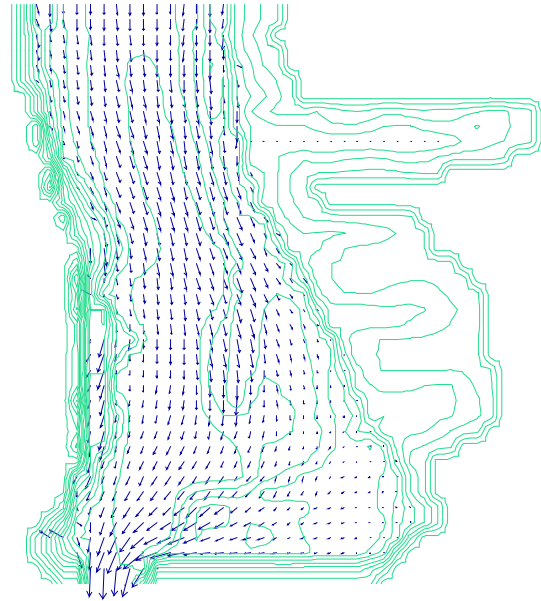


Рисунок 2. Розрахунковий план течії на поверхні русла акваторії ВБ з рельєфом поверхні Нижньодніпровської ГЕС при пропуску розрахункового паводку

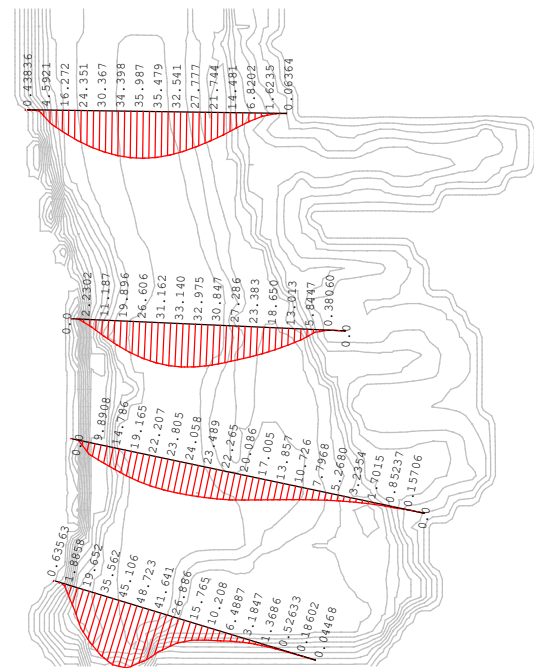


Рисунок 3. Розрахункові епюри питомої витрати акваторії ВБ з рельєфом поверхні Нижньодніпровської ГЕС при пропуску перевірного паводку

Виконані та зведені до таблиці 1 розрахунки з оцінки величин втрат для двох варіантів (без «островів» та за їх наявності) показують, що вплив штучних «островів» на величину втрат на вході у водоскидні споруди практично відсутній. Як видно з результатів, пропуск розрахункового паводку за наявності штучних «островів» забезпечує навіть трохи меншу величину втрат, ніж за їх відсутності. Останнє пояснюється збільшенням значення та більш плавним входом.

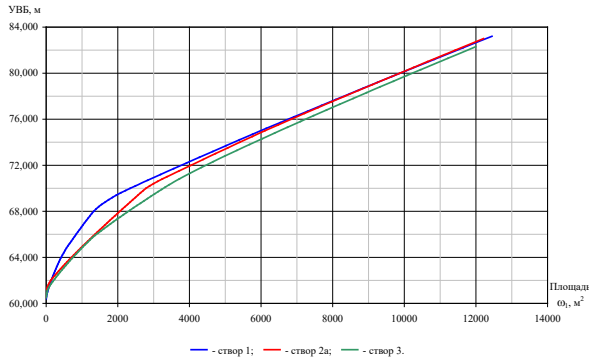


Рисунок 4. Графік зміни площ живих перерізів у створах 1, 2а та 3 ($\omega_1 = f(\nabla \text{ПВБ})$)

Виходячи з аналізів результатів цих досліджень слід констатувати, що стиснення живого перерізу русла у верхньому б'єфі практично не тягне за собою погіршення гідравлічних умов входу, а отже, і не тягне за собою зменшення пропускної здатності гідровузла. З цієї причини зазначене стиснення за умов забезпечення проектної (нормативної) пропускної спроможності не вимагає розчищення русла у верхньому б'єфі.

III. ВИСНОВКИ

Проведення математичного моделювання гідравлічних режимів верхнього та нижнього б'єфів гідровузлів на етапі проектування є необхідною

умовою для забезпечення їх надійності, ефективності та безпеки при подальшій експлуатації.

Використання диференціальних двовимірних рівнянь Сен-Венана дозволяє проводити розрахунки гідравлічних режимів верхнього та нижнього б'єфів гідровузлів, в тому числі низьконапірних.

Згідно проведених розрахунків гідравлічних режимів верхнього б'єфу Нижньодніпровської ГЕС за наявності в акваторії водосховища підводних штучних «островів», які не враховувалися на етапі проектування, було встановлено, що вплив підводних штучних «островів» на величину втрат практично відсутній, а отже, і не тягне за собою зменшення проектної (нормативної) пропускної здатності гідровузла, хоча при цьому необхідно відмітити зміни ряду характерних параметрів (швидкостей, втрат напору тощо).

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Рябенко О. А. Гідроелектростанції в особливих природно-кліматичних умовах : підручник / О. А. Рябенко. - Рівне: НУВГП, 2024, 192 с.
- [2] Гидравлические расчеты водосбросных гидротехнических сооружений: Справочное пособие - М.: Энергоатомиздат, 1988.
- [3] Слиский С.М. Гидравлические расчеты высоконапорных гидротехнических сооружений. М.: Энергия, 1979, 334 с.
- [4] R.J. Houghtalen, A.O. Akan, N.H.C. Hwang, Fundamentals of Hydraulic Engineering Systems. Fourth Edition. London: Pearson Education Ltd., 2010, 472 ps.
- [5] Гродненская ГЭС на реке Неман. Рабочая документация. Здание ГЭС. Гидравлические расчеты и исследования водоприемника, подводящего и отводящего каналов (арх. №1458-34-T07). г. Харьков: ОАО «Укргидпроект», 2008, 104 с.
- [6] Нижньодніпровська ГЕС. URL: <http://dn-gaes.com> (дата звернення 15.10.2024).
- [7] Технічний звіт по інженерно-геодезичним вишукуванням в верхньому б'єфі ГЕС-2. Київ: НВ ПП «Гідросервіс», 2005, 24 с.