

Чисельне моделювання гідравлічних параметрів нижнього б'єфу гідроелектростанції

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.029>

Чернобиль О.Є.

Науково-дослідний відділ
ПРАТ «УКРГІДРОПРОЕКТ»
Харків, Україна
oleg.chernobyl@gmail.com

Попруга П.В.

Науково-дослідний відділ
ПРАТ «УКРГІДРОПРОЕКТ»
Харків, Україна
p.v.popruha@nuwm.edu.ua

Поплавський Д.М.

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

Анотація — У роботі розглянуто необхідність проведення гідравлічних розрахунків нижнього б'єфу гідроелектростанцій. Показано, що проведення чисельного моделювання, яке базується на інтегруванні рівнянь Нав'є-Стокса для нестисливих потоків напівявним ітераційним методом, є найбільш раціональним для розрахунку гідравлічних параметрів потоку в нижньому б'єфі гідровузлів. Проведено чисельне моделювання гідравлічного режиму роботи нижнього б'єфу при паралельній роботі ДніпроГЕС-1 та ДніпроГЕС-2, наведено аналіз отриманих результатів.

Ключові слова — чисельне моделювання; гідроелектростанція; нижній б'єф; розподіл швидкості; конструктивна стійкість.

екологічну рівновагу довкілля [2]. Просторово неоднорідні потоки, турбулентність, коливання рівня води та інтенсивна взаємодія потоку з елементами споруд і русловим середовищем потребують комплексного аналізу для забезпечення безпеки експлуатації.

Ефективна оцінка гідравлічного режиму в нижньому б'єфі має ґрунтуватися на поєднанні методів математичного моделювання (зокрема чисельного) з натурними та лабораторними дослідженнями. Такі дослідження дозволяють виявити зони підвищених напружень і потенційно небезпечні ділянки русла. Це в подальшому дозволить формувати обґрунтовані проєктні рішення з урахуванням динаміки потоку.

I. ВСТУП

Надійна та безпечна експлуатація гідротехнічних споруд є визначальними чинниками ефективної експлуатації об'єктів гідроенергетики. Сучасне трактування надійності охоплює не лише інженерно-конструктивні характеристики, а й системний аналіз впливів природного, техногенного та аварійного характеру, включаючи тривимірну динаміку потоку, зсуви та взаємодію з довкіллям [1].

Основні аспекти забезпечення безпеки включають конструктивну стійкість споруд при дії граничних навантажень, гідравлічну стабільність (здатність уникати формування зон розмиву, вихрових течій, локальної нестійкості потоку), експлуатаційну надійність (узгоджена робота водоскидів, турбін, дренажних і допоміжних систем) та екологічну безпеку.

Нижній б'єф гідроелектростанцій є складним гідродинамічним середовищем, у якому реалізується цілий спектр процесів, що впливають як на технічний стан гідротехнічних споруд, так і на

II. ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

Сучасні дослідження гідравлічних режимів у нижніх б'єфах гідроелектростанцій все частіше стикаються з необхідністю врахування просторової неоднорідності потоків. Традиційні одновимірні та навіть деякі двовимірні моделі, що базуються на усереднених по перерізу або по глибині характеристиках потоку, часто виявляються недостатньо адекватними для опису складних гідродинамічних явищ, що виникають у нижніх б'єфах. Просторова неоднорідність, яка проявляється у вигляді нерівномірного розподілу швидкостей, тисків, турбулентності та інших гідравлічних параметрів у трьох вимірах, відіграє важливу роль у багатьох процесах, що відбуваються в нижньому б'єфі, і її ігнорування може призводити до значних похибок у прогнозах та оцінках.

Просторова неоднорідність гідравлічних режимів у нижніх б'єфах ГЕС є багатограним явищем, зумовленим низкою факторів. Основні прояви цієї

неоднорідності проявляються в розподілах швидкостей, турбулентності, тиску тощо.

Неоднорідний розподіл швидкостей по глибині та ширині проявляється при роботі гідротурбін та водоскидних споруд. При цьому формуються струменеві течії, зони з підвищеними та зниженими швидкостями, а також вторинні циркуляційні рухи. Геометрія русла нижнього б'єфа (повороти, звуження, розширення) ще більше ускладнює цей розподіл, призводячи до утворення зон відриву потоку, вихорів та інших тривимірних структур течії.

Неоднорідний розподіл турбулентності особливо притаманний в зонах з високими градієнтами швидкостей, зокрема за лопатями турбін, на водоскидах та в місцях з різкою зміною геометрії русла. Просторовий розподіл характеристик турбулентності (інтенсивність, кінетична енергія, швидкість дисипації) є вкрай нерівномірним і впливає на процеси змішування, транспортування наносів, аерації води та розсіювання забруднюючих речовин.

Неоднорідний розподіл тиску в потоці, що виражається локальними змінами швидкостей та кривизна ліній течії. У зонах прискорення тиск може знижуватися, створюючи ризик кавітації, особливо поблизу гідротехнічних споруд.

У звивистих руслах та за гідротехнічними спорудами виникають поперечні циркуляційні рухи (вторинні течії), які суттєво впливають на розподіл основної течії, транспортування наносів та формування донних деформацій.

Для опису таких явищ на практиці використовуються рівняння Нав'є–Стокса у вигляді системи диференціальних рівнянь (1), що дозволяє моделювати нестационарні рухи з урахуванням середньої глибини потоку:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(vh)}{\partial x} &= 0, \\ \frac{\partial(vh)}{\partial t} + \frac{\partial(v^2h + \frac{1}{2}gh^2)}{\partial x} &= -gh \frac{\partial z}{\partial x} - \frac{\tau}{\rho} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де v – середня швидкість течії, h – рівень води, z – висота дна, τ – дотичне напруження, g – прискорення вільного падіння, ρ – густина води, x – координата вздовж русла, t – час.

Пряме чисельне розв'язання рівнянь Нав'є–Стокса для натурних умов проводиться відносно складно, особливо у випадку турбулентного та сильно неоднорідного потоку в нижньому б'єфі. У зв'язку з цим доцільно використовувати чисельне моделювання. До програмного забезпечення, що дозволяє провести чисельне моделювання роботи нижнього б'єфу гідроелектростанцій, належать HEC-RAS, MIKE, ANSYS Fluent, Flow-3D, CFD++, STAR-CCM+, Autodesk CFD, OpenFOAM [3]. Провівши аналіз вказаного програмного забезпечення, було зроблено висновок, що один з найоптимальніших варіантів розрахунку параметрів потоку, що проходить через гідротехнічні споруд

гідровузлів, є використання багатофазного методу розрахунку InterFOAM програмного середовища (бібліотек) OpenFOAM.

InterFoam призначений для моделювання перехідних процесів двох нестисливих, ізотермічних та незмішуваних рідин. Він обробляє ламінарні та турбулентні процеси, враховуючи як ньютонівські, так і неньютонівські рідини. Він використовує підхід об'єму рідини (VoF) для точного визначення межі розділу між середовищами.

InterFOAM використовує об'єднаний в один алгоритми PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators) та SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) для зв'язку тиску та імпульсу, забезпечуючи стійкість при обробці перехідних потоків з великими часовими кроками. InterFOAM доповнюється методами недорелаксації для забезпечення стабільності конвергенції [4]. Алгоритм проведення розрахунку за допомогою InterFOAM описано в [5].

Багатофазний метод InterFOAM був використаний для проведення перевірконого розрахунку роботи нижнього б'єфу Дніпровської ГЕС при умові паралельної роботи ГЕС-1 та ГЕС-2 з проектними потужностями. Вказаний розрахунок був виконаний для аналізу гідравлічних навантажень на відкоси відвідного русла, що приводять до поступового їх руйнування.

До складу основних споруд Дніпровської ГЕС входять: будівлі ГЕС-1 та ГЕС-2, водозливна бетонна гребля, глухі право- та лівобережні греблі, шпора, щитова стінка, аванкамера з бетонним укосом, бетонний укис відвідного русла та бетонне кріплення берега русла.

Для проведення розрахунку була створена спрощена 3D модель гідровузла площею в плані близько 2,5 км² (рис. 1). Вихідними даними слугували проектні величини довоєнного періоду. Рельєф дна нижнього б'єфу був побудований виходячи з [6].



Рисунок 1. Розрахункова схема чисельного моделювання нижнього б'єфу Дніпровської ГЕС

При проведенні чисельного моделювання не менш важливо прийняти оптимальні граничні умови. Для InterFOAM граничні умови задаються для трьох основних величин: тиску, швидкості та фазової функції. Граничними умовами швидкості на вході передбачають задання певної об'ємної витрати з урахуванням змін площі перерізу, тобто забезпечення постійної масової витрати. Так для ГЕС-1 проектна витрата складала 2025 м³/с, відповідно ГЕС-2 - 3080 м³/с. Величини тиску на вході задавалися виходячи з величин розрахункового напору (для ГЕС-1 він рівний

36,3 м, для ГЕС-2 – 34,3 м). Фазової функції на вході рівна одиниці, на виході найбільш раціонально використовувати граничну умову «нульового градієнту», що прирівнює значення шуканої величини на границі до її значенні в найближчому до граничної ділянці центрі комірки. Швидкість на виході розраховується автоматично при умові нульового градієнту, коли потік залишає розрахункову область. Величина тиску на виході розраховує автоматично градієнт тиску таким чином, щоб потік на границі відповідав заданому граничною умовою швидкості.

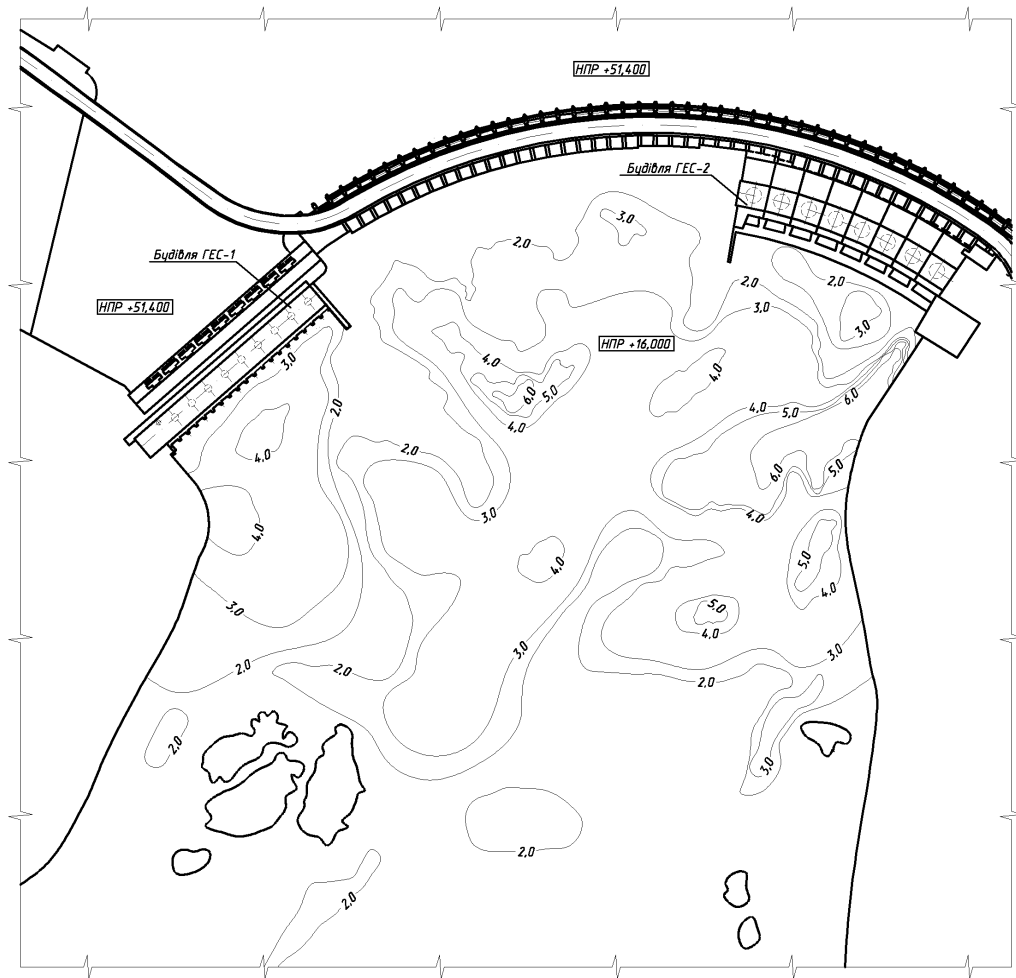


Рисунок 2. Усереднений в часі розподіл швидкості в нижнього б'єфу Дніпровської ГЕС (план-розріз на відмітці +13,000 м)

Згідно описаними вище вихідними даними та граничними умовами було проведено чисельне моделювання роботи нижнього б'єфу Дніпровської ГЕС. Тривалість симуляції визначалася умовою стабілізації потоку та відносної остійності розподілу швидкості в часі. Результати моделювання були проаналізовані та перенесені на характерні план-розрізи: відмітки +16,000 м, +15,000 м, +13,000 м, +10,000 м, +5,000 м та +3,000 м. На рис. 2 наведено план-розріз на відмітці +13,000 м усередненого в часі розподілу швидкості в нижньому б'єфі Дніпровської ГЕС. Для зручності на план-розріз (рис. 2) не наносилися швидкості потоку величина яких не перевищувала 2 м/с.

Аналізуючи отримані дані було встановлено, що найбільші гідравлічні навантаження на відкоси відповідного русла при паралельній роботі ГЕС-1 та ГЕС-2 розташовуються практично біля виходу потоку з будівель ГЕС (рис. 2). Дане твердження в повній мірі відповідає даним, що були отримані під час проведення регулярних візуальних обстежень.

Додатково було проведено аналіз донних швидкостей потоку. Цей аналіз дозволяє встановити зони дна нижнього б'єфу, що найбільше схильні до розмиву через відносну велику донну швидкість. Результати аналізу схематично наведені на рис. 1, що в цілому відповідає картині руху потоку в нижньому б'єфі Дніпровської ГЕС.

Розподіл швидкості по глибині потоку має класичний характер. При аналізі результатів аномальних відхилень не зафіксовано, що свідчить про вірність наведеного розрахунку.

ВИСНОВКИ

Особливістю нижнього б'єфа гідровузлів є складна, просторово неоднорідна та динамічно нестійка структура потоку, яка формується внаслідок дії водозливних витоків, роботи турбін, руслової геометрії, локального рельєфу дна та експлуатаційних режимів гідротехнічних споруд. Урахування тривимірного характеру течії та просторово-часових варіацій є критично важливим при моделюванні гідравлічних процесів, зокрема для проектування енергогасильних систем, оцінювання руслових деформацій та прогнозування зон акумуляції наносів.

Використання диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса в чисельному моделюванні дозволяє проводити розрахунки гідравлічних режимів верхнього та нижнього б'єфів гідроелектричних станцій.

В роботі представлений перевірочний розрахунок роботи нижнього б'єфу Дніпровської ГЕС при умові паралельної роботи ГЕС-1 та ГЕС-2 з проектними потужностями, при цьому був використаний багатофазний метод InterFOAM програмного середовища OpenFOAM.

Згідно проведених розрахунків нижнього б'єфу Дніпровської ГЕС було встановлено зони найбільших гідравлічних навантажень на відкоси відвідного русла та донних швидкостей. Отримані дані добре узгоджуються з результатами візуальних та підводно-технічного обстежень.

- [1] Іваненко І.П. Безпека експлуатації гідротехнічних споруд/ І.П. Іваненко, В.С. Петров; Видавництво НАН України, 2018. – 256 с.
- [2] R.J. Houghtalen, A.O. Akan, N.H.C. Hwang, Fundamentals of Hydraulic Engineering Systems. Fourth Edition. London: Pearson Education Ltd., 2010, 472 ps.
- [3] Z. Li Comparison of wave modeling methods in CFD solvers for ocean engineering applications / Li Z., Deng G., Queutey P., Bouscasse B., Ducrozet G., Gentaz L., Le Touzé D., Ferrant P.// Ocean Engineering. – 2019. – Vol. 188. – 106237.
- [4] Попруга П.В. Чисельне моделювання паводкового режиму роботи нижнього б'єфу низьконапірних гідроелектростанцій/ П.В. Попруга, Д.М. Поплавський// «Комунальне господарство міст. Серія: «Інформаційні технології та інженерія». Харків, №1, 2025.
- [5] OpenFOAM: User Guide v2112. InterFoam [Електронний ресурс] // OpenCFD Ltd. – Режим доступу: <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-applications-solvers-multiphase-interFoam.html> (дата звернення: 01.08.2025). – Назва з екрана.
- [6] Технічний звіт на виконання підводно-технічного (батиметричного) обстеження підводної частини гідротехнічних споруд верхнього та нижнього б'єфу Дніпровської ГЕС. Київ: ТОВ «ДАЙВТЕХНОБУД 2», 2013, 36 с.