



Рябенко О. А., д.т.н., професор, Попруга П. В., аспірант (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, o.a.riabenko@nuwm.edu.ua, p.v.popruha@nuwm.edu.ua), **Поплавський Д. М., к.т.н.** (ПРАТ «УКРГІДРОПРОЕКТ», м. Харків, dm.m.poplavskiy@gmail.com)

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРАВЛІЧНОГО РЕЖИМУ ВЕРХЬОГО Б'ЄФУ НИЖНЬОДНІСТРОВСЬКОЇ ГЕС ПРИ ПРОПУСКУ РОЗРАХУНКОВОГО ПАВОДКА

У статті представлено результати чисельного моделювання гідродинамічних процесів у верхньому б'єфі Нижньодністровської ГЕС за умов пропуску розрахункового паводка. Наведено ключові особливості побудови моделі та розглянуто вплив прийнятих граничних умов і спрощень на гідравлічну картину течії. Моделювання здійснено з використанням методу Volume of Fluid (VoF) у середовищі OpenFOAM, що дає змогу дослідити поведінку поверхні розділу між двома середовищами (повітря – вода). Проведено порівняння результатів з аналітичними розрахунками, виконаними на основі двовимірних рівнянь Сен-Венана з урахуванням наявності неоднорідного дна та донного тертя.

Ключові слова: верхній б'єф; граничні умови; розподіл швидкості; профіль вільної поверхні; пропуск паводка.

Вступ. У сучасних умовах змін клімату та зростання частоти екстремальних гідрологічних явищ забезпечення надійної та безпечної експлуатації гідротехнічних споруд набуває особливої актуальності. Одним із ключових елементів у системі регулювання стоку є гідроелектростанція (ГЕС), яка виконує не лише енергетичну, а й важливу водорегулюючу та протипаводкову функцію. Пропуск повеневих і паводкових витрат через водоскидні споруди є відповідальним етапом у роботі ГЕС, від якого залежить безпека населення, господарських об'єктів і природного середовища, розташованих нижче за течією [1].

Чисельне моделювання гідравлічних процесів у верхньому б'єфі ГЕС дозволяє детально вивчити профіль вільної поверхні, розподіл тиску та швидкостей потоку, що є важливими для ухвалення проєктних рішень щодо вибору оптимального режиму роботи

гідровузла за різних гідравлічних умов. Особливої уваги потребують розрахунки для аварійних або розрахункових паводків, оскільки від точності прогнозу залежить можливість мінімізації їх негативного впливу [2].

Неврахування результатів моделювання на етапі проєктування може призвести до ухвалення неоптимальних технічних рішень, що знижують рівень безпечної експлуатації гідротехнічних споруд у майбутньому. Це, своєю чергою, підвищує ризик виникнення аварійних ситуацій і руйнування конструкцій. Зокрема, можна згадати руйнування гребель Баньцяо (Китай), Мальпассе (Франція) та критична ситуація на гідровузлі Оровілл (США) [3].

Об'єкт дослідження. Верхній б'єф Нижньодністровської ГЕС (відомої також як Дністровська ГЕС-2) є частиною Дністровського каскаду [4].

Функціонування Нижньодністровської ГЕС тісно пов'язане з експлуатаційним режимом розташованих вище Дністровської ГЕС та Дністровської ГАЕС, утворюючи єдину систему керування водним стоком у басейні р. Дністер. Зокрема, у період паводків надходження води з Дністровського водосховища до нижнього б'єфу регулюється через Нижньодністровську ГЕС (рис. 1). У разі проходження паводків та повеней із розрахунковою або меншою забезпеченістю, а також за виникнення аварійних ситуацій на зазначених гідровузлах, можуть спостерігатися скиди, обсяги яких значно перевищують середньобогаторічні витрати.



Рис. 1. План-схема акваторії верхнього б'єфу Нижньодністровської ГЕС з рельєфом поверхні (станом на вересень 2005 р.)



- — — — — – розрахунковий переріз 1-1, який наведений в роботі;
— · — – додаткові розрахункові перерізи;
— — — — — – розрахункові перерізи, аналітичних розрахунків на основі двовимірних рівнянь Сен-Венана

Для безпечної експлуатації гідротехнічних споруд в таких умовах виникає потреба у своєчасному та точному прогнозуванні гідродинамічної обстановки у верхньому б'єфі. Це, своєю чергою, можливе лише за умови використання сучасних методів чисельного моделювання відповідних гідрологічних і гідродинамічних процесів.

Верхній б'єф Нижньодністровської ГЕС характеризується складною гідравлікою: змінна глибина, нерівне дно, наявність обводнених ділянок і руслових утворень (рис. 1). За таких умов класичні розрахункові методи часто не дають достатньо точних результатів, що може призвести до некоректного вибору режиму роботи гідровузла. Таким чином, актуальність проведення чисельного моделювання верхнього б'єфу Нижньодністровської ГЕС зумовлена потребою підвищення надійності прогнозу гідравлічних характеристик при пропуску паводків і повеней, а також удосконалення методів управління такими ситуаціями [5; 6].

Методика дослідження. Чисельне моделювання гідродинамічних процесів у верхньому б'єфі Нижньодністровської ГЕС виконувалося на базі платформи обчислювальної гідродинаміки OpenFOAM [7]. Моделювання проводилося для двофазного середовища «повітря – вода» з урахуванням гравітації, турбулентності та складної геометрії, що, безумовно, значною мірою наближено до реальних умов. Математично моделювання ґрунтується на методі Volume of Fluid (VoF), який передбачає розв'язання диференціальних рівнянь нерозривності (1) та імпульсу (2):

$$\nabla \cdot \vec{U} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{U} \otimes \vec{U}) = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nabla \cdot \vec{R} + \vec{S}, \quad (2)$$

де ∇ – дивергенція вектора швидкості, \vec{U} – вектор швидкості потоку, p – тиск, ρ – густина, t – час, \vec{R} – тензор в'язких напружень, \vec{S} – джерела (включаючи гравітаційні та турбулентні).

Обчислення реалізовано у вигляді покрокового ітераційного циклу, який виконується для кожної комірки розрахункової сітки:

1. Розв'язання рівняння імпульсу (2) для визначення швидкості.

2. Побудова рівняння тиску шляхом підстановки в рівняння нерозривності (1).
3. Корекція тиску та перерахунок швидкості.
4. За необхідності – додаткові корекції з урахуванням об'ємної фази.

Також, для визначення профілю вільної поверхні, виконується розрахунок диференціального рівняння VoF-функції (також відомого як транспортне), за допомогою якого визначається об'ємна частка рідини в кожній комірці сітки:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \vec{U}) + \nabla \cdot (\vec{U}_c \cdot \alpha (1 - \alpha)) = 0, \quad (3)$$

де α – фазова функція (VoF-функція), \vec{U}_c – штучна (компресійна) швидкість для збереження чіткого інтерфейсу між фазами.

Для проведення чисельного моделювання було створено об'ємну розрахункову модель верхнього б'єфу Нижньодністровської ГЕС площею близько 2,0 км² у масштабі 1:1, яка базувалася на даних топографічних вимірювань [8]. Через складність проведення моделювання було прийнято низку наближень, що мали вплив на кінцевий результат. Зокрема, розглядався сценарій раптової зміни пропуску розрахункової витрати, яка приймалася на рівні паводка з розрахунковою забезпеченістю 0,1%. Такий сценарій можливий виключно у разі різного роду аварійних ситуацій, що можуть відбутися вище за течією. У реальності витрати зростають поступово (через поетапне відкриття затворів), тому сценарій є умовно граничним і характеризує максимальні навантаження на верхній б'єф. Також не враховано роботу Нижньодністровської ГЕС (відсутній підпір від гідротехнічних споруд гідровузла), що спрощує картину потоку на виході моделі та незначно змінює її в зазначеній області (розрахунок показує дещо нижчі рівні води та завищені значення актуальних швидкостей). Водночас слід зазначити, що наближення, притаманні іншим існуючим методам [9], мають ще більший вплив на похибку їхніх розрахунків.

Для моделювання описаного вище сценарію роботи верхнього б'єфу Нижньодністровської ГЕС були задані такі граничні умови:

1. *Вхідний переріз*: задаються параметри, що дозволяють визначити розрахункову витрату води за рахунок масового переносу;
2. *Вихідний переріз*: задаються параметри, що забезпечують умови вільного витікання;
3. *Об'ємна модель (нижня частина та сторони)*: забезпечується відсутність потоків середовища через межі моделі (відсікання розрахункової сітки), що дозволяє рідині рухатися паралельно



вдovж моделі, при цьому шорсткість поверхні або взаємодія середовища зі стінками є мінімальною;

4. *Верхня частина:* задаються параметри, що дозволяють описати рух повітря.

Результати чисельного моделювання. У межах дослідження було виконано розрахунок гідродинамічного процесу з метою визначення поведінки вільної поверхні потоку у верхньому б'єфі Нижньодністровської ГЕС за умов проходження розрахункової паводкової витрати. Загальна тривалість чисельного моделювання (симуляції) становила 500 секунд; при цьому відносна похибка обчислень у комірках сітки не перевищувала 1%. На рис. 2 наведено розрахункові профілі вільної поверхні та епюри актуальних швидкостей потоку для розрахункового перерізу 1-1 (рис. 1) у різні моменти часу.

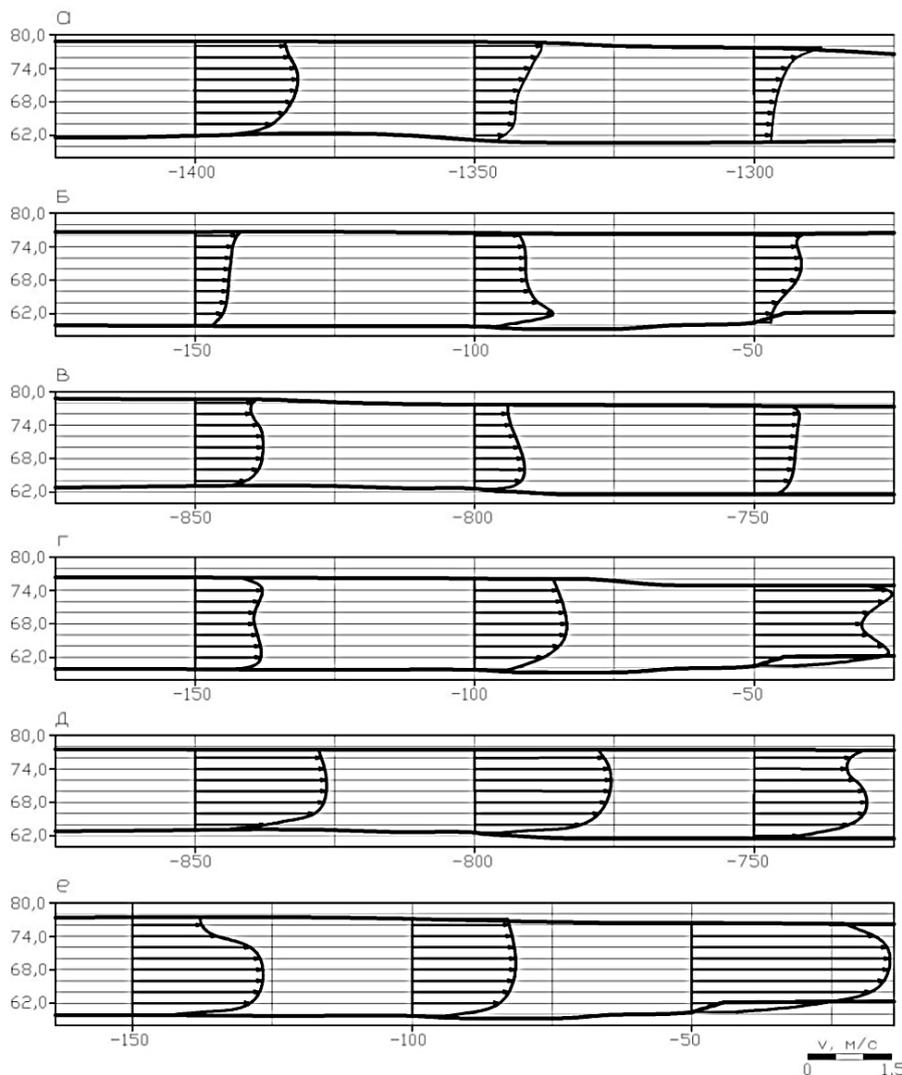


Рис. 2. Профіль вільної поверхні та епюри актуальних швидкостей розрахункового перерізу 1-1: а, б – при часу симуляції $t=10$ с; в, г – при часу симуляції $t=60$ с; д, е – при часу симуляції $t=120$ с;

- — розрахунковий профіль вільної поверхні;
— — епюра розрахункових актуальних швидкостей;
— — усереднені значення швидкостей в перерізі, що були отримані за допомогою аналітичних розрахунків на основі двовимірних рівнянь Сен-Венана

Аналіз отриманих даних розрахунку профілю вільної поверхні та значень актуальних швидкостей у характерних перерізах у часі дозволив встановити наступне.

Під час проходження розрахункової витрати, що почала надходити одномоментно, спостерігається утворення хвильового явища. Висота хвилі безпосередньо залежить від довжини водної поверхні поперечного перерізу 1-1, через який вона проходить. Так, максимальне значення висоти хвилі досягало приблизно 2,2 м (рис. 2, а, в). Із збільшенням довжини водної поверхні висота хвилі зменшувалася до значення 1,5 м.

Після проходження хвильового явища рівень води у водосховищі утримувався на відмітках +77,300÷+77,500 м (рис. 2, а), що є меншим за проєктну відмітку (+77,800 м). При цьому на початковому етапі симуляції рівень води на вході до гідротехнічних споруд Нижньодністровської ГЕС становив +76,500÷+76,700 м (рис. 2, б). Далі з часом рівень води на вході до гідротехнічних споруд почав знижуватися (рис. 2, г, е). Зазначені розбіжності між розрахунковими та проєктною відмітками рівнів води у водосховищі пояснюються прийнятими наближеннями, що були описані вище.

Значення актуальних швидкостей потоку під час проходження хвильового явища не перевищували 2,0 м/с (рис. 2, а, в). Спостерігалася залежність розподілу актуальних швидкостей у перерізах від їх площі. Після проходження хвильового явища спостерігалася стабілізація потоку: епюри актуальних швидкостей ставали подібними між собою як за формою, так і за значеннями. При цьому значення актуальних швидкостей зросли до 2,5 м/с (рис. 2, д).

Актуальні швидкості на вході до гідротехнічних споруд Нижньодністровської ГЕС збільшувалися з часом. Так, на початковому етапі чисельного моделювання значення актуальних швидкостей становили 0,5–0,7 м/с (рис. 2, б). Далі величини швидкостей зростали та досягали значень 2,2 м/с (рис. 2, г), а після стабілізації потоку – 3,5 м/с (рис. 2, е). Наведені результати добре узгоджуються з аналітико-теоретичним аналізом руху потоку в межах верхнього б'єфу під час надходження розрахункового паводка.



Результати чисельного моделювання були порівняні з аналітичними розрахунками, виконаними на основі двовимірних рівнянь Сен-Венана з урахуванням наявності неоднорідності рельєфу дна та донного тертя (розрахунки проводилися в ПРАТ «УКРГІДРОПРОЕКТ» під керівництвом головного спеціаліста науково-дослідного відділу Є. Ф. Павлова). Спостерігаються деякі розбіжності в результатах, що пояснюються особливостями зазначеного аналітичного підходу. Основною його особливістю є те, що кінцеві значення швидкостей визначаються як осереднені величини як у часі, так і за глибиною потоку, що є безумовним недоліком цього методу. Водночас слід відзначити, що отримані чисельні дані продемонстрували відносно високий ступінь збіжності з аналітичними результатами, отриманими на основі двовимірних рівнянь Сен-Венана з урахуванням наявності неоднорідності рельєфу дна та донного тертя після проходження хвильового явища у водоймі, що підтверджує коректність застосованого підходу.

Висновки. Проведене чисельне моделювання гідродинамічних процесів у верхньому б'єфі Нижньодністровської ГЕС за сценарієм пропуску розрахункового паводка підтвердило доцільність використання методу Volume of Fluid (VoF) у середовищі OpenFOAM.

Аналіз динаміки вільної поверхні потоку в умовах проходження паводкової витрати показав формування хвильового фронту, висота якого змінювалась залежно від геометрії русла. Після проходження хвилі рівень води стабілізувався, однак спостерігалось незначне зниження рівнів на вході до гідроспоруди через прийняті наближення.

Дослідження кінематичної структури потоку виявило залежність швидкостей від площі поперечного перерізу 1-1. На пізніших етапах спостерігалась стабілізація швидкісного поля, при цьому максимальна швидкість потоку досягала 3,5 м/с. Отримані чисельні результати підтверджені аналітичними розрахунками, що свідчить про надійність застосованої моделі.

Модель показала хорошу збіжність з аналітичними розрахунками за двовимірними рівняннями Сен-Венана, що підтверджує її валідацію для задач такого класу.

1. Hager W. H. *Hydraulics of Dams and River Structures*. London : Taylor & Francis, 2004. 595 p. 2. R. J. Houghtalen, A. O. Akan, N. H. C. Hwang. *Fundamentals of Hydraulic Engineering Systems*. Fourth Edition. London : Pearson Education Ltd., 2010. 472 p. 3. Рябенко О. А. *Гідроелектростанції в особливих природно-кліматичних умовах* : підручник. Рівне : НУВГП, 2024.

192 с. **4.** Нижньодністрівська ГЕС. URL: <http://dn-gaes.com> (дата звернення: 01.05.2025). **5.** Гидравлические расчеты водосбросных гидротехнических сооружений : справочное пособие. М. : Энергоатомиздат, 1988. **6.** Слисский С. М. Гидравлические расчеты высоконапорных гидротехнических сооружений. М. : Энергия, 1979. 334 с. **7.** OpenFOAM Foundation. OpenFOAM User Guide. URL: <https://openfoam.org>. (дата звернення: 01.05.2025). **8.** Технічний звіт по інженерно-геодезичним вишукуванням в верхньому б'єфі ГЕС-2. Київ : НВ ПП «Гідросервіс», 2005. 24 с. **9.** Anderson J. D. Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications. McGraw-Hill, 1995. 672 p.

REFERENCES:

1. Hager W. H. Hydraulics of Dams and River Structures. London : Taylor & Francis, 2004. 595 p. **2.** R. J. Houghtalen, A. O. Akan, N. H. C. Hwang. Fundamentals of Hydraulic Engineering Systems. Fourth Edition. London : Pearson Education Ltd., 2010. 472 p. **3.** Riabenko O. A. Hidroelektrostantsii v osoblyvykh pryrodno-klimatychnykh umovakh : pidruchnyk. Rivne : NUVHP, 2024. 192 s. **4.** Nyzhnodnistrovska HES. URL: <http://dn-gaes.com> (data zvernennia: 01.05.2025). **5.** Hydravlycheskye raschety vodosbrosnykh hydrotekhnicheskyykh sooruzheniy : spravochnoe posobyе. M. : Enerhoatomyzdat, 1988. **6.** Slysskiy S. M. Hydravlycheskye raschety vysokonapornykh hydrotekhnicheskyykh sooruzheniy. M. : Enerhyia, 1979. 334 s. **7.** OpenFOAM Foundation. OpenFOAM User Guide. URL: <https://openfoam.org>. (data zvernennia: 01.05.2025). **8.** Tekhnichniy zvit po inzhenerno-geodezychnym vyshukuvanniam v verkhnomu biefi HES-2. Kyiv : NV PP «Hidroservis», 2005. 24 s. **9.** Anderson J. D. Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications. McGraw-Hill, 1995. 672 p.

Riabenko O. A., Doctor of Engineering, Professor, Popruha P. V., Post-graduate Student (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne), **Poplavskiy D. M., Candidate of Engineering (Ph.D.)** (PJSC «UKRHYDROPROJECT», Kharkiv)

NUMERICAL MODELLING OF THE HYDRAULIC REGIME IN THE UPPER POOL OF THE LOWER DNIESTER HYDROPOWER PLANT DURING DESIGN FLOOD PASSAGE

The article presents the results of numerical modeling of hydrodynamic processes in the upstream reach of the Lower Dniester Hydroelectric Power Station during the passage of a design flood. The main objective of the study was to obtain reliable information about



the behavior of the water flow, changes in the free surface level, and the distribution of flow velocities under extreme discharge conditions. The OpenFOAM computational platform was used as the simulation environment, employing the Volume of Fluid (VoF) method, which enables modeling of water – air phase interactions while accounting for gravity, turbulence, and complex terrain geometry.

Particular attention was paid to the influence of boundary conditions and modeling assumptions on the simulation results. Despite the simplifications made, the numerical data demonstrated a high degree of consistency with analytical calculations based on 2-D Saint-Venant equations.

The analysis of the results confirmed the effectiveness of the VoF method for hydrodynamic simulations in complex geometric environments and highlighted its potential as a decision-support tool in flood management scenarios. The model identified zones with potentially the highest hydraulic loads, which is critical information for the real-time prevention of emergency situations.

The findings support safer and more reliable operation of hydroelectric facilities. This is especially relevant in the context of climate change and the rising occurrence of extreme weather events.

***Keywords:* upper reservoir; boundary conditions; depth-averaged velocities; free surface profile; flood passage.**