

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КІНЕМАТИЧНОЇ СТРУКТУРИ ПОТОКУ В НИЖНЬОМУ Б'ЄФІ НИЗЬКОНАПІРНИХ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

Павло Попруга

ПРИВАТНЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО «УКРГІДРОПРОЕКТ»
9, пр. Науки, Харків, 61145, Україна
Національний університет водного господарства та природокористування
12, вул. Соборна, Рівне, 33000, Україна
p.v.popruha@nuwm.edu.ua, orcid.org/0009-0007-1134-5230

DOI: 10.32347/2524-0021.2025.52.81-89

Анотація. У статті розглядається актуальність чисельного моделювання кінематичної структури потоку у нижньому б'єфі низьконапірних гідроелектростанцій як інструмента підвищення надійності та безпеки експлуатації в умовах екстремальних паводкових подій. Запропоновано підхід до тривимірного чисельного моделювання на прикладі Нижньодністровської ГЕС для режиму пропуску паводкової витрати із забезпеченістю 0,1 %. Методика поєднує повномасштабне відтворення геометрії гідровузла, опис вільної поверхні методом об'ємної частки рідини та застосування перевірених турбулентних моделей у середовищі OpenFOAM. Розрахункова постановка охоплює характерні режими роботи затворів, що дозволяє відтворити реалістичну просторово-часову картину течії. Просторову структуру швидкісного поля проаналізовано у п'яти поперечних перерізах, восьми поздовжніх перерізах та на п'яти глибинних рівнях, що дозволило побудувати карти швидкісних полів, ідентифікувати ділянки локальних змін інтенсивності руху, простежити розвиток рециркуляцій і планову нерівномірність струменя, а також окреслити зони потенційної концентрації навантажень, небезпечні для берегових і руслових укріплень. Верифікацію моделі здійснено шляхом порівняння з результатами лабораторних досліджень Нижньодністровської ГЕС для того самого рівня забезпеченості, що підтвердило достовірність моделі за діапазонами швидкостей у характерних перерізах і закономірностями їхнього згасання за течією. Інтеграція тривимірного чисельного моделювання у стандартні гідротехнічні розрахунки розширює можливості інженерного аналізу: забезпечує обґрунтований вибір схем маневрування затворів, сприяє завчасному виявленню зон потенційної концентрації гідродинамічних навантажень, підвищує якість прогнозу руслових деформацій і, як наслідок, рівень експлуатаційної безпеки споруд. Отримані результати можуть бути використані для уточнення режимів пропуску паводків і планування моніторингу в нижньому б'єфі.

Ключові слова: гідротехнічні споруди, кінематична структура потоку, нижній б'єф, низьконапірні гідроелектростанції, швидкісне поле, чисельне моделювання.

ВСТУП

Безпечна експлуатація гідротехнічних споруд низьконапірних гідроелектростанцій безпосередньо залежить від точності прогнозування гідравлічних процесів у нижньому б'єфі [1]. Під час пропуску паводкових витрат у цьому елементі гідровузла формуються складні нестационарні потоки, що супроводжуються інтенсивною

турбулізацією та нерівномірним розподілом швидкостей.

Низьконапірні гідроелектростанції характеризуються невеликим напором за відносно великих витрат, компактними водоскидними та водопровідними спорудами, короткими гасильними басейнами й малими глибинами у нижньому б'єфі, тому вони особливо чутливі до коливань рівнів і локальної концентрації швидкостей.

Традиційно головну увагу приділяли визначенню *профілю вільної поверхні* водного потоку. Це дозволяє встановити відмітки гребенів споруд і довжину кріплень русла. Проте практика показує, що навіть при допустимих рівнях води у нижньому б'єфі можуть виникати критичні явища – локальні розмиви, рециркуляційні потоки, вібрації споруд, а також збійні течії, тобто локальні відхилення струменя від основного потоку, зумовлені градієнтами тиску та геометрією русла, що породжують перехресні та підкручувальні рухи. Вони безпосередньо пов'язані з *кінематичною структурою потоку*, тобто просторовим розподілом швидкостей і турбулентних пульсацій [2].

Саме тому сучасні дослідження у галузі гідроенергетики в дедалі частіше переходять від двовимірних спрощених схем до *тривимірних моделей*, здатних відтворити повний просторовий рух води. Забезпечення надійної та ефективної експлуатації низьконапірних ГЕС в умовах змін клімату та зростання екстремальних паводкових ситуацій потребує уточнення методів гідравлічного розрахунку [3].

Проблемними аспектами, які не враховуються при класичних розрахунках є:

- формування *розподілу швидкості* у нижньому б'єфі, де швидкість потоку перевищує 8–10 м/с;
- поява *гідравлічного стрибка* з різким погашенням енергії потоку та складною турбулентною структурою;
- утворення *рециркуляційних зон*, які можуть спричиняти деструкцію кріплень та ускладнювати роботу гідроагрегатів;
- вплив просторової структури потоку на стійкість бетонних та ґрунтових гідротехнічних споруд.

За таких обставин актуальною науковою задачею є розробка та апробація методики тривимірного чисельного моделювання кінематичної структури потоку у нижньому б'єфі з урахуванням особливостей гідротехнічних споруд.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Останні десятиліття характеризуються активним розвитком чисельного моделювання методів обчислювальної

гідродинаміки (Computational Fluid Dynamics – CFD). Вони довели свою ефективність у вивченні складних гідродинамічних процесів у межах роботи гідротехнічних спорудах [4]. У світовій практиці активно застосовуються таке програмне забезпечення, як ANSYS Fluent, STAR-CCM+, FLOW-3D та OpenFOAM. Вони дозволяють відмовитися від спрощень класичних розрахункових схем і досліджувати повне тривимірне поле швидкостей.

Дослідження [5-7] демонструють ефективність CFD-моделювання при аналізі режимів роботи гідротехнічних споруд, проте більшість з них зосереджені на визначенні вільної поверхні. У численних роботах [6, 7] показано, що чисельне моделювання дозволяє отримати розгляд варіантів, ніж натурні або лабораторні експерименти, які мають обмеження через масштаби та високу варіативність.

Ряд авторів [8, 9] акцентує увагу на моделюванні *профілю вільної поверхні*, тоді як питання просторової кінематики потоку досі залишається недостатньо висвітленим. Публікації [5-9] вказують на обмеженість експериментальних даних щодо розподілу швидкостей у нижніх б'єфах через складність проведення вимірювань. Основною проблемою є складність відтворення геометрії гідровузлів в лабораторних умовах, що потребує проведення ряду спрощень в конструкції моделі та як наслідок суттєво збільшує величину похибки досліджень [10, 11].

Застосування відкритого коду OpenFOAM довело свою ефективність у задачах, пов'язаних із багатofазними нестисливими потоками [12]. Однак прикладів його використання для аналізу *швидкісних полів у нижніх б'єфах ГЕС* поки що небагато, що визначає наукову новизну цієї роботи.

МЕТА І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Розробка та апробація методики тривимірного CFD-моделювання кінематичної структури потоку у нижньому б'єфі низьконапірних ГЕС із використанням програмного середовища OpenFOAM на прикладі Нижньодністровської ГЕС.

До складу основних споруд Нижньодністровської ГЕС (рис. 1) входять: правобережна та лівобережна ґрунтові греблі, водозливна гребля з регульованими та нерегульованими (автоматичними) секціями, суміщена будівля ГЕС, в якій встановлені капсульні гідроагрегати з 3-х прогоновим поверхневим водозливом, відвідний канал нижнього б'єфу, руслові укріплення та підхідні ділянки.

Цей гідровузол є нижнім шаблем у складі Дністровського каскаду ГЕС-ГАЕС України, що призначений для виробітку електричної енергії та створення підпору вище розташованої ділянки р. Дністер (для забезпечення запроєктованих експлуатаційних режимів роботи Дністровської ГЕС та Дністровської ГАЕС).



Рис. 1. Нижньодністровська ГЕС. Вигляд з нижнього б'єфу

Fig. 1. Lower Dniester HPP. View from the downstream reach

1. Методологія побудови тривимірної моделі нижнього б'єфу

Першим етапом чисельного дослідження є створення просторової геометрії гідровузла та нижнього б'єфу, яка повинна відтворювати характерні конструктивні елементи споруд і руслову ділянку.

Геометрична модель. Побудовано геометричну модель у масштабі 1:1. Особливу увагу приділено відтворенню геометрії в зоні, де формуються найбільш складні швидкісні структури [15].

Побудова обчислювальної сітки. Геометрію дискретизовано на багатогранну сітку, загалом понад 200 тисяч комірок [16, 17].

Граничні умови. Для опису потоку були прийняті такі умови:

- *вхід (inlet)*: задання постійної об'ємної витрати Q відповідно до розрахункової падовкової витрати ($8320 \text{ м}^3/\text{с}$);
- *вихід (outlet)*: забезпечення виходу сталої масової витрати;
- *дно та береги*: частинки поблизу поверхні зазнають обмеженого руху відносно потоку.

2. Загальні принципи тривимірного моделювання гідравлічних процесів

Розрахунки виконано у OpenFOAM (солвер *interFoam*), який реалізує метод *Volume of Fluid (VoF)* для двофазного нестисливого середовища «вода + повітря» [18].

Метод VoF дозволяє описати динаміку вільної поверхні, відслідковуючи розподіл фазової функції α у кожній комірці сітки:

- $\alpha = 1$ – комірка заповнена водою;
- $\alpha = 0$ – комірка з повітрям;
- $0 < \alpha < 1$ – зона фазового поділу.

Турбулентність. Оскільки у нижньому б'єфі формуються гідравлічні стрибки з високим рівнем турбулентності [14], використано моделі $k - \varepsilon$ та $k - \omega$ SST, які описують [19, 20]:

- кінетичну енергію турбулентних пульсацій (k);
- швидкість її розсіювання (ε або ω).

Чисельний алгоритм. У середовищі OpenFOAM реалізується покроковий ітераційний процес:

1. Розв'язання рівняння імпульсу для визначення швидкостей (1).
2. Корекція тиску через рівняння нерозривності (2).
3. Уточнення швидкостей з урахуванням тиску (3).
4. Розрахунок VoF-функції для відтворення вільної поверхні (4).
5. Ітерації до досягнення збіжності (5).

3. Базові рівняння для тривимірного розрахунку

Рівняння імпульсу (Нав'є–Стокса):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 u + g, \quad (1)$$

де u – швидкість потоку; p – тиск; ν – кінематична в'язкість; ρ – густина; g – вектор сили тяжіння.

Рівняння нерозривності (баланс маси):

$$\nabla \cdot u = 0, \quad (2)$$

де u – вектор швидкості.

Корекція швидкості тиском:

$$u^{n+1} = u^* - \Delta t \frac{1}{\rho} \nabla p, \quad (3)$$

де u^* – проміжна (предикторна) швидкість; Δt – крок за часом; ρ – густина; p – статичний тиск; ∇p – градієнт тиску.

Рівняння VoF-функції (фазовий розподіл):

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha u) + \nabla \cdot [\alpha(1 - \alpha)u_c] = 0, \quad (4)$$

де α – фазова функція; u – швидкість потоку; u_c – штучна компресійна швидкість для уточнення інтерфейсу.

Критерій збіжності ітерацій:

$$\max(\|r_p\|, \|r_u\|, \|r_\alpha\|) < \varepsilon_{tol}, \quad (5)$$

де r_p , r_u , r_α – нев'язки для тиску, швидкості та VoF-величини.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПОЯСНЕННЯ

У 1981–1984 роках були проведені лабораторні експериментальні дослідження [21] на просторовій гідравлічній моделі масштабу 1:50. За результатами яких була побудована кінематична структура потоку в характерних перерізах (табл. 1).

На етапі препроцесингу чисельного моделювання розглядалася робота водоскидного фронту буферного гідровузла за розрахункової витрати $Q = 8320 \text{ м}^3/\text{с}$, $H = 75,600 \text{ м}$, та схема при якій всі водозливні отвори відкриті. Поле течії вимірювали у п'яти поперечних перерізах I–V (перерізи через водоскидний фронт), для восьми поздовжніх перерізах 1–8 (перерізи уздовж течії) з фіксацією швидкостей на п'яти глибинних рівнях (рис. 2, 3): $V_{\text{поверхня}}$ (~75,600 м), $V_{0.2h}$ (~72,400÷71,900 м), $V_{0.6h}$ (~69,3÷68,300 м), $V_{0.8h}$ (~66,100÷64,600 м) і $V_{\text{поблизу дна}}$ (~63,000÷61,000 м). Повні матриці швидкостей наведено в табл. 1.

Перед проведенням чисельного моделювання паводкового режиму роботи нижнього б'єфу Нижньодністровської ГЕС було проведено дослідження роботи верхнього б'єфу гідровузла [13] та профілю вільної

поверхні в нижньому б'єфі при аналогічних режимах роботи [14].

Вертикальна структура швидкостей.

Для п'яти глибинних рівнів (поверхня, 0.2h, 0.6h, 0.8h, поблизу дна) модель відтворила головні риси поля швидкостей та числові діапазони:

Поверхня. Максимальна зафіксована швидкість $V \approx 5,69 \text{ м/с}$ (переріз III, лівобережна половина, поздовж. переріз 5). Мінімальні поверхневі значення в руслі – $2,8 \div 3,1 \text{ м/с}$ (окремі точки перерізів III–V, правобережні зони).

$V_{0.2h}$. Характерні швидкості $4,0 \div 4,8 \text{ м/с}$ у основній струменевій частині та локальні піки до $5,43 \text{ м/с}$ (переріз I, поздовж. переріз 6).

$V_{0.6h}$. Поступове згасання: $3,8 \div 4,6 \text{ м/с}$ у більшості точок. У моделі фіксуються окремі максимуми до $5,0 \div 5,2 \text{ м/с}$ на осі потоку (перерізи II–III, поздовж. перерізи 6–7).

$V_{0.8h}$. Типові значення $3,1 \div 4,6 \text{ м/с}$, а найменші значення $\sim 2,22 \div 2,62 \text{ м/с}$ у прибережних і заплавних зонах перерізів III–V (підтягується до «мертвих» зон за рахунок в'язкості та шорсткості).

Поблизу дна. Загальний діапазон $0,99 \div 3,43 \text{ м/с}$. Максимуми у зоні дії основного струменя (переріз I, поздовж. переріз 6), мінімуми – у затінених прибережних областях і за конструктивними елементами споруд (перерізи I–V, поздовж. перерізи 1, 4, 7–8).

Вертикальні коефіцієнти профілю. Середній спад швидкості від поверхні до дна становить $\sim 35 \div 60 \%$ (напр., переріз I, поздовж. переріз 6: $5,51 \rightarrow 3,43 \text{ м/с}$; переріз V, поздовж. переріз 1: $3,43 \rightarrow 1,40 \text{ м/с}$). Рівень на $V_{0.2h}$ зберігає $\sim 80 \div 95\%$ поверхневої швидкості (різниця, як правило $\leq 0,5 \text{ м/с}$), що характерно для напірних струменів після водобійної частини. Рівень на $V_{0.8h}$ залишається $\sim 60 \div 80 \%$ від поверхневого значення.

Кінематика потоку в плані. Безпосередньо біля греблі (до перерізу I) підтверджується значна нерівномірність у плані: формуються «виплески» поверхневих швидкостей у регульованій секції й над будівлею

ГЕС, тоді як у прибережних зонах уздовж глухих ділянок помітні поперечні течії та послаблення швидкостей (від перерізу II до перерізу V спостерігається вирівнювання поля). У міру віддалення до перерізів III–V потік «розсипається» й вирівнюється по ширині русла: пікові поверхневі швидкості зменшуються, а відмінності між прольотами послаблюються.

Окремо відзначимо поперечну асиметрію у перерізах II–III (вищі значення зліва), що відповідає «аналоговим» відомостям про стискання підхідного потоку береговими течіями та формування берегової рециркуляції. Локальні придонні реверси вздовж водобійних стінок у зоні регульованих прольотів корелюють із пониженими придонними швидкостями та «прогалинами» вимірів у відповідних поздовжніх перерізах.

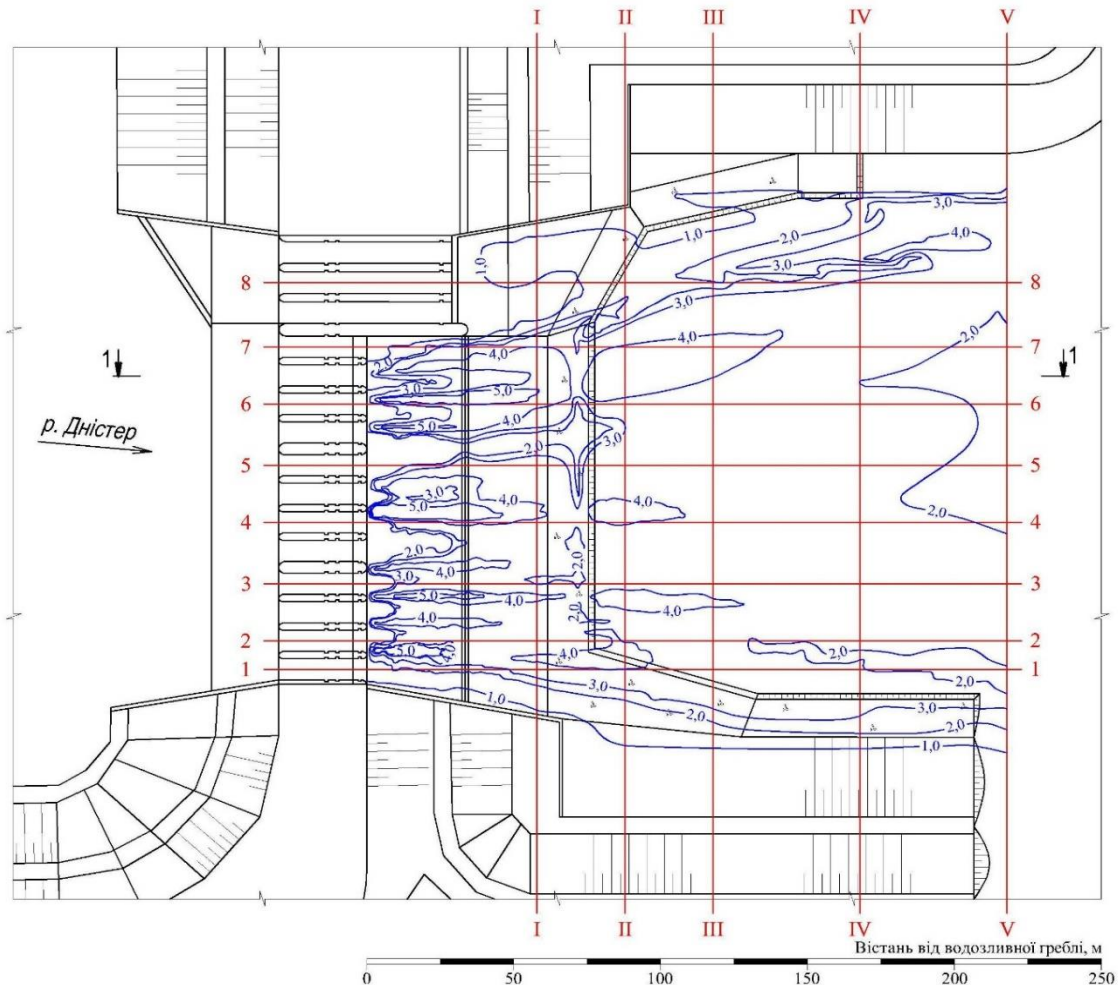


Рис. 2. План розміщення поперечних та поздовжніх перерізів в нижньому б'єфі. Усереднений в часі розподіл швидкості (план-розріз на відмітці +65,000 м)

Fig. 2. Layout of cross- and longitudinal sections in the tailrace. Time-averaged velocity field (plan view at elevation +65.000 m)

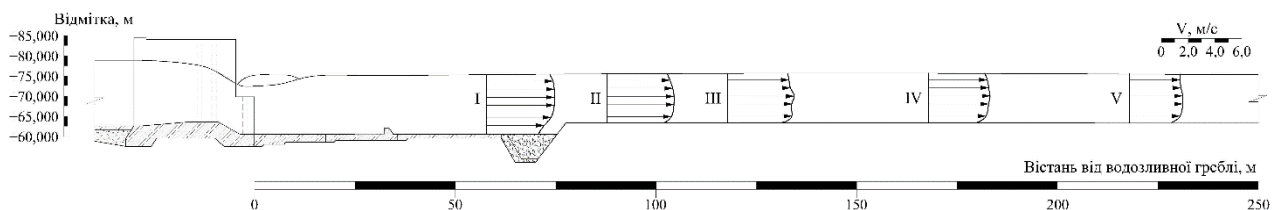


Рис. 3. Розріз 1–1. Епюри усереднених значень швидкості в характерних перерізах нижнього б'єфу

Fig. 3. Section 1–1. Time-averaged velocity profiles in representative sections of the tailrace

Табл. 1. Значення швидкостей по вертикалі $Q = 8320 \text{ м}^3/\text{с}$, РНБ = +75,600 м
Table 1. Vertical velocity values $Q = 8320 \text{ м}^3/\text{с}$, TWL = +75,600 m

№№ поперечного перерізу	Розподіл швидкостей по вертикалі (відмітка)		Швидкості руху води по вертикалі, м/с №№ поздовжнього перерізу							
			1	2	3	4	5	6	7	8
I	$V_{\text{пов.}}$ ($\approx +75,600$)	лабор.	4,95	3,96	4,75	4,54	5,51	5,51	-	4,85
		розрах.	2,8	4,0	3,4	3,6	4,0	4,4	4,4	5,2
	$V_{0,2h}$ (+71,900)	лабор.	4,85	4,08	4,95	4,54	4,85	5,43	-	3,96
		розрах.	4,2	4,6	4,4	4,2	5,2	5,0	4,8	5,4
	$V_{0,6h}$ (+68,300)	лабор.	4,08	4,85	4,75	4,85	4,85	4,54	-	1,72
		розрах.	4,4	4,8	4,2	4,2	4,2	5,4	5,2	3,8
	$V_{0,8h}$ (+64,600)	лабор.	3,12	4,08	3,71	4,32	4,08	4,65	-	0,99
		розрах.	3,6	4,4	3,8	4,0	3,4	5,4	5,4	1,4
II	$V_{\text{пов.}}$ ($\approx +75,600$)	лабор.	2,08	2,43	2,22	2,97	2,97	3,43	-	0,99
		розрах.	1,8	2,4	2,2	3,0	2,8	3,4	2,2	1,2
	$V_{0,2h}$ (+72,400)	лабор.	4,65	4,20	4,43	4,32	4,75	4,65	-	3,57
		розрах.	3,0	3,8	3,8	3,8	3,8	4,0	4,0	4,8
	$V_{0,6h}$ (+69,300)	лабор.	4,75	4,32	4,32	4,54	4,32	4,65	-	3,13
		розрах.	3,2	4,4	3,8	4,2	4,6	4,6	4,8	5,2
	$V_{0,8h}$ (+66,100)	лабор.	4,32	4,32	4,32	4,32	3,96	3,96	-	3,96
		розрах.	3,8	4,2	4,2	4,0	4,6	5,0	5,0	4,4
III	$V_{\text{пов.}}$ ($\approx +75,600$)	лабор.	3,43	3,71	3,84	3,84	3,84	3,71	-	3,57
		розрах.	3,8	4,0	4,0	4,0	3,8	4,8	4,8	3,2
	$V_{0,2h}$ (+72,400)	лабор.	1,98	2,97	2,22	2,62	2,43	2,22	-	1,72
		розрах.	2,6	3,2	2,8	3,0	2,8	2,6	3,0	1,8
	$V_{0,6h}$ (+69,300)	лабор.	4,08	4,43	4,64	4,85	5,69	4,75	-	3,13
		розрах.	2,2	2,8	4,0	3,8	3,6	3,8	4,2	4,8
	$V_{0,8h}$ (+66,100)	лабор.	3,96	4,32	4,64	4,75	4,95	4,65	-	3,13
		розрах.	2,8	3,6	4,2	4,4	4,6	4,2	4,8	5,2
IV	$V_{\text{пов.}}$ ($\approx +75,600$)	лабор.	3,96	4,08	4,54	4,32	4,65	4,43	-	2,62
		розрах.	3,0	4,2	4,4	4,4	4,6	5,0	5,0	3,8
	$V_{0,2h}$ (+72,400)	лабор.	3,71	3,83	4,32	4,20	4,43	3,96	-	2,22
		розрах.	3,6	4,4	4,2	4,0	4,0	4,4	5,2	2,6
	$V_{0,6h}$ (+69,300)	лабор.	1,72	1,98	2,22	1,98	1,72	2,22	-	1,72
		розрах.	2,2	2,0	1,8	2,0	2,0	2,0	2,2	2,2
	$V_{0,8h}$ (+66,100)	лабор.	3,84	4,43	4,20	4,43	4,54	3,71	-	2,80
		розрах.	2,2	2,8	3,8	4,0	3,8	4,0	4,4	4,6
V	$V_{\text{пов.}}$ ($\approx +75,600$)	лабор.	3,96	4,32	4,20	4,32	4,54	4,20	-	2,62
		розрах.	2,6	3,4	4,0	4,0	4,8	4,6	4,6	5,0
	$V_{0,2h}$ (+72,400)	лабор.	3,71	4,08	4,08	4,20	4,20	4,08	-	2,22
		розрах.	3,0	4,2	4,0	3,8	4,6	4,8	5,0	4,2
	$V_{0,6h}$ (+69,300)	лабор.	2,97	3,57	3,71	3,96	3,71	3,84	-	2,22
		розрах.	3,4	3,8	3,8	4,0	4,0	4,2	4,6	4,0
	$V_{0,8h}$ (+66,100)	лабор.	1,40	1,40	1,40	1,98	1,72	1,72	-	0,99
		розрах.	1,6	1,6	1,8	1,8	1,8	1,8	2,0	2,0
VI	$V_{\text{пов.}}$ ($\approx +75,600$)	лабор.	3,43	4,20	4,43	4,20	4,54	4,20	-	2,97
		розрах.	2,4	2,8	3,2	3,4	3,0	3,4	3,6	3,8
	$V_{0,2h}$ (+72,400)	лабор.	3,84	4,08	4,32	4,20	4,32	4,08	-	2,22
		розрах.	2,8	3,6	3,6	3,8	3,8	3,6	3,8	3,8
	$V_{0,6h}$ (+69,300)	лабор.	3,57	3,96	4,08	3,96	4,20	3,96	-	2,22
		розрах.	3,0	3,8	4,0	3,4	4,2	4,0	4,2	4,2
	$V_{0,8h}$ (+66,100)	лабор.	2,97	3,43	3,71	3,13	3,96	3,43	-	1,98
		розрах.	3,6	3,6	3,4	3,0	3,8	3,8	3,8	4,6
VII	$V_{\text{пов.}}$ ($\approx +75,600$)	лабор.	1,40	1,40	1,98	1,72	1,72	1,72	-	1,40
		розрах.	1,8	1,8	2,0	2,0	1,8	1,8	1,6	1,6

Примітка. В таблиці наведені дані швидкостей лабораторних досліджень (лабор.) та чисельного моделювання (розрах.) для характерних перерізів.

ВИСНОВКИ

Запропонована тривимірна CFD-методика в OpenFOAM коректно відтворює кінематичну структуру потоку у нижньому б'єфі низьконапірних ГЕС, дозволяючи ідентифікувати рециркуляції та планову нерівномірність, неочевидні з одного лише профілю вільної поверхні.

Для паводкового пропуску ($Q = 8320 \text{ м}^3/\text{с}$) основне енергогасіння зосереджене між перерізами I–III на відстані $\approx 80\text{--}190 \text{ м}$ від водоскидного фронту. Біля перерізу IV ($\approx 200 \text{ м}$) спостерігається вирівнювання поля течії в поздовжньому напрямку та зниження інтенсивності коливань швидкості.

Найризикованішою щодо локальних підмивів і переформування русла є периферія потоку (зона поздовжнього перерізу №8) та контактні ділянки біля берегів і переходу від гасильного басейну до руслової частини.

З інженерної точки зору, рекомендовано симетричне маневрування затворами, пріоритетний моніторинг та посилення кріплення у зоні інтенсивного енергогасіння й біля берегів, а також контроль ділянок можливої концентрації гідродинамічних навантажень. За дотримання цих заходів пропуск паводкових витрат оцінюється як безпечний і керований.

ЛІТЕРАТУРА

1. Novak P., Moffat A. I. B., Nalluri C., Narayanan R. Hydraulic Structures. 4th ed. London; New York: Taylor & Francis (CRC Press/Routledge), 2017. 728 p. ISBN 978-0-415-38625-8
2. Рябенко О. А. Гідроелектростанції в особливих природно-кліматичних умовах: підручник // Рівне: НУВГП, 2024. 192 с. ISBN 978-966-327-595-6
3. Melville B.W., Coleman S.E. Bridge Scour – Highlands Ranch (USA): Water Resources Publications, 2000. 550 p. ISBN-13: 978-1-887201-18-6.
4. Ferziger J. H., Perić M., Street R. L. Computational Methods for Fluid Dynamics, 4th ed. Springer International Publishing, 2020. 596 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-99693-6>
5. Olsen N. R. B. CFD modelling for hydraulic structures: class notes. Trondheim: Department of Hydraulic and Environmental Engineering, NTNU, 2001. 37 p. ISBN 82-7598-048-8
6. Versteeg H.K., Malalasekera W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. Harlow: Pearson Education, 2007. 520 p. ISBN-13: 978-0-13-127498-3
7. Weller H.G., Tabor G., Jasak H., Fureby C. A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques // Computers in Physics, 1998. Vol. 12, №6. P. 620–631. <https://doi.org/10.1063/1.168744>
8. Mitov A., Nikolov N., Nedelchev K., Kralov I. CFD Modeling and Experimental Validation of the Flow Processes of an External Gear Pump // Processes, 2024, 12(2), 261. <https://doi.org/10.3390/pr12020261>
9. Chanson H. Hydraulics of Open Channel Flow, 3rd ed. Amsterdam: Elsevier, 2021. 650 p. ISBN-13: 978-0-7506-5978-9
10. Andersson B., Andersson R., Håkansson L., Mortensen M., Sudiyo R., van Wachem B. Computational Fluid Dynamics for Engineers. Cambridge (UK): Cambridge University Press, 2012. 228 p. <https://doi.org/10.1017/cbo9781139093590>
11. Jasak H. Error Analysis and Estimation for the Finite Volume Method with Applications to Fluid Flows: PhD Thesis. London: Imperial College London, 1996. 198 p. URL : <http://hdl.handle.net/10044/1/8335>
12. OpenFOAM: User Guide v2112. InterFoam [Електронний ресурс] // OpenCFD Ltd. URL: <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-applications-solvers-multiphase-interFoam.html> (дата звернення: 30.10.2025) – Назва з екрана
13. Рябенко О. А, Попруга П. В, Поплавський Д. М. Математичне моделювання гідравлічних режимів водного потоку низьконапірних ГЕС з використанням рівнянь Сен-Венана // Modeling, Control and Information Technologies: Proceedings of International Scientific and Practical Conference. Рівне: НУВГП, 2025. Вип. 7. С. 110–113. <https://doi.org/10.31713/mcit.2024.029>
14. Попруга П. В, Поплавський Д. М. Чисельне моделювання паводкового режиму роботи нижнього б'єфу низьконапірних гідроелектростанцій // «Комунальне господарство міст. Серія: «Інформаційні технології та інженерія». 2025. Том 4. Вип. №192. С. 318–323. <https://doi.org/10.33042/3083-6727-2025-4-192-318-323>
15. Peterka A. J. Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators. Engineering

Monograph No.25. U.S. Bureau of Reclamation, 1984. 240 p.

16. **Bayon A., Valero D., García-Bartual R., López-Jiménez P.A.** Performance Assessment of OpenFOAM and FLOW-3D in the Numerical Modeling of a Low Reynolds Number Hydraulic Jump // *Environmental Modelling & Software*, 2016. 80. P. 322–335. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.02.018>

17. **Valero D., Viti N., Gualtieri C.** Numerical Simulation of Hydraulic Jumps. Part 1: Experimental Datasets and Baseline Modelling // *Water*, 2019. 11(1):36. <https://doi.org/10.3390/w11010036>

18. **Hirt C. W., Nichols B. D.** Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries // *Journal of Computational Physics*, 1981. 39(1). P. 201–225. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(81\)90145-5](https://doi.org/10.1016/0021-9991(81)90145-5)

19. **Menter F. R.** Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications // *AIAA Journal*, 1994. 32(8). P. 1598–1605. <https://doi.org/10.2514/3.12149>

20. **Launder B. E., Spalding D. B.** The Numerical Computation of Turbulent Flows // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1974. 3(2). P. 269–289. [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(74\)90029-2](https://doi.org/10.1016/0045-7825(74)90029-2)

21. Модельні дослідження пропуску паводку через гідровузол буферного водосховища Дністровського каскаду ГЕС: звіт про НДР (заклучний). Архів ПРАТ «УКРГІДРОПРОЕКТ», вх. інв. №589-34-Т141, 1984, 63 с.

REFERENCES

1. **Novak, P., Moffat, A. I. B., Nalluri, C., & Narayanan, R. (2017)** *Hydraulic Structures*. 4th ed. London; New York: Taylor & Francis (CRC Press/Routledge). ISBN 978-0-415-38625-8

2. **Riabenko, O. A. (2024).** *Hydropower plants in special natural and climatic conditions: manual*. NUWEE. ISBN 978-966-327-595-6 [in Ukrainian]

3. **Melville, B. W., & Coleman, S. E. (2000).** *Bridge Scour*. Highlands Ranch (USA): Water Resources Publications. ISBN-13: 978-1-887201-18-6

4. **Ferziger, J.H., Perić, M., & Street, R. L. (2020).** *Computational Methods for Fluid Dynamics*, 4th ed. Berlin: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-99693-6>

5. **Olsen, N. R. B. (2001)** *CFD modelling for hydraulic structures: class notes*. Trondheim: Department of Hydraulic and Environmental Engineering, NTNU. 37 p. ISBN 82-7598-048-8

6. **Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007).** *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Harlow: Pearson Education, 520 p. ISBN-13: 978-0-13-127498-3

7. **Weller, H.G., Tabor, G., Jasak, H., & Fureby, C. (1998).** A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques. *Computers in Physics*, 12(6). 620–631. <https://doi.org/10.1063/1.168744>

8. **Mitov, A., Nikolov, N., Nedelchev, K., & Kralov, I. (2024).** CFD Modeling and Experimental Validation of the Flow Processes of an External Gear Pump. *Processes*, 12(2), 261. <https://doi.org/10.3390/pr12020261>

9. **Chanson, H. (2004).** *Hydraulics of Open Channel Flow*. Amsterdam: Elsevier, 650 p. ISBN-13: 978-0-7506-5978-9

10. **Andersson, B., Andersson, R., Håkansson, L., Mortensen, M., Sudiyo, R., & van Wachem, B. (2012).** *Computational Fluid Dynamics for Engineers*. Cambridge (UK): Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/cbo9781139093590>

11. **Jasak, H. (1996).** *Error Analysis and Estimation for the Finite Volume Method with Applications to Fluid Flows* (PhD thesis). London: Imperial College London. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10044/1/8335>

12. **OpenFOAM:** User Guide v2112. InterFoam [Electronic resource]. *OpenCFD Ltd*. Regime of access:

<https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-applications-solvers-multiphase-interFoam.html> (date of the application: 30.10.2025). Header from the screen

13. **Riabenko, O. A., Popruha, P. V. & Poplavskiy, D. M. (2025).** Mathematical modeling of hydraulic flow regimes in low-head hydropower plants using the Saint-Venant equations. *Modeling, Control and Information Technologies: Proceedings of International Scientific and Practical Conference*. 7, 110–113. <https://doi.org/10.31713/mcit.2024.029> [in Ukrainian]

14. **Popruha, P. V. & Poplavskiy, D. M. (2025).** Numerical modelling of the downstream reach of the low-head hydropower plants during design flood passage. *Municipal Economy of Cities. Series: Information Technologies and Engineering*. 4(192). 318-323. <https://doi.org/10.33042/3083-6727-2025-4-192-318-323> [in Ukrainian]

15. **Peterka, A. J. (1984).** *Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators* (Engineering Monograph No. 25). U.S. Bureau of Reclamation.

16. **Bayon, A., Valero, D., García-Bartual, R., & López-Jiménez, P.A. (2016).** Performance

assessment of OpenFOAM and FLOW-3D in the numerical modeling of a low Reynolds number hydraulic jump. *Environmental Modelling & Software*, 80, 322–335.

<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.02.018>

17. Valero D., Viti N., & Gualtieri C. (2019). Numerical simulation of hydraulic jumps. Part 1: Experimental datasets and baseline modelling. *Water*, 11(1):36.

<https://doi.org/10.3390/w11010036>

18. Hirt, C. W., & Nichols, B. D. (1981). Volume of Fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 39(1), 201–225.

[https://doi.org/10.1016/0021-9991\(81\)90145-5](https://doi.org/10.1016/0021-9991(81)90145-5)

19. Menter, F. R. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, 32(8), 1598–1605.

<https://doi.org/10.2514/3.12149>

20. Launder, B.E., & Spalding, D. B. (1974). The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3(2), 269–289.

[https://doi.org/10.1016/0045-7825\(74\)90029-2](https://doi.org/10.1016/0045-7825(74)90029-2)

21. PJSC UKRHYDROPROJECT (1984). Model studies of flood routing through the hydraulic structure of the buffer reservoir of the Dniester cascade of hydroelectric power plants. Research report (final). [in Ukrainian]

Numerical modelling of flow kinematics in the downstream reach of low-head hydropower plants

Pavlo Popruha

Abstract. The article examines the relevance of numerical modelling of the kinematic flow structure in the tailrace of low-head hydropower plants as a means to enhance reliability and operational safety under extreme flood events conditions. A three-dimensional numerical modelling approach is proposed and demonstrated for the Lower Dniester Hydropower Plant operated in a flood-release regime with an exceedance probability of 0.1%. The methodology combines a full-scale reconstruction of the hydrocomplex geometry, free-surface tracking via the Volume of Fluid (VoF) method, and validated turbulence models implemented in OpenFOAM. The computational setup encompasses representative gate-operation modes and alternative spillway opening configurations, enabling a realistic space–time representation of the flow. The spatial structure of the velocity field is analysed across five cross-sections, eight longitudinal sections, and five depth levels, which allows construction of velocity maps, identification of zones with local changes in flow intensity, tracking of recirculation development and planform non-uniformity of the jet, and delineation of areas where hydrodynamic loads are likely to concentrate and pose risks to bank and bed protection. Model verification is performed by comparison with laboratory investigations for the same hydrological exceedance probability, confirming fidelity with respect to velocity ranges in characteristic sections and the patterns of downstream attenuation. Integrating three-dimensional numerical modelling into standard hydraulic design practice expands the scope of engineering analysis: it supports evidence-based selection of gate-operation schemes, facilitates early detection of potential concentrations of hydrodynamic loads, improves forecasts of channel deformation, and, consequently, enhances the operational safety of hydraulic structures. The results can be used to refine flood-release regimes and to plan monitoring activities in the tailrace.

Keywords: hydraulic structures, flow kinematics, downstream reach, low-head hydropower plants, velocity field, numerical modelling.

Стаття надійшла до редакції 03.11.2025