

2. Романенко, Л.Г. Теоретична механіка: Навч. посіб. для студ. ВУЗів / Л. Г. Романенко, В. Г. Солодов. 2-е вид. Х.: ХДАДТУ, 2002. 270 с.

3. Міщенко І.В., Воропай О.В., Красніков С.В. Теоретична механіка. Частина І. Статика. Кінематика: навчальний посібник. Х.: ФОП Бровін О.В. 2025. 158 с. ISBN 978-617-8238-95-7

4. Міщенко І.В., Воропай О.В., Красніков С.В. Теоретична механіка. Частина ІІ. Динаміка: навчальний посібник. Х.: ФОП Бровін О.В. 2025. 154 с. ISBN 978-617-8238-94-0

5. Міщенко І.В. Теоретична механіка: конспект лекцій. Х.: ХНАДУ, 2023. 207 с.

6. Нескреба Е. Є., Воропай О. В., Карпенко В. О. Методичні вказівки до практичних занять, РГР та СРС з дисципліни «Теоретична механіка», розділ «Статика» для студентів денної та заочної форм навчання напряму підготовки G19 (192) – «Будівництво та цивільна інженерія». Х.: ХНАДУ, 2025. 124 с.

7. Воропай О. В., Шарапата А. С. Технічна механіка: Конспект лекцій. Харків : ХНАДУ, 2022. 124 с.

8. Мяковський В. А., Велешук П. І. Удосконалення технологічного процесу ремонту кузовних елементів автомобіля з дослідженням процесу фіксації пристроїв з пошкодженою поверхнею.

9. M. Diachuk, O. Lykhodii, Leontiev, D., L. Ryzhykh, & Yu. Aleksandrov. (2022). Dynamic modeling of semitrailer trucks equipped by steered wheels. Journal of Mechanical Engineering and Sciences, 16(1), 8691–8705. <https://doi.org/10.15282/jmes.16.1.2022.04.0687>

10. Леонтьєв Д.М., Лиходій О.С., Малий В.М. (2025). Особливості вирішення задачі повороту керованих коліс вантажних автомобілів. Підвищення якості продукції машинобудівних та ремонтних підприємств: зб. матеріалів ІV Всеукр. наук.-практ. онлайн-семінару, 29 трав. 2025 р./ Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т. – Харків, С. 10–14.

*Науковий консультант: д.т.н., проф. Воропай О. В., зав. каф. деталей машин та теорії механізмів і машин.*

Задорожний Дмитро, студент групи АА-21-24,  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

## **ЗАСТОСУВАННЯ CFD МЕТОДІВ В ЛАБОРАТОРНІЙ РОБОТІ «ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РІВНЯННЯ БЕРНУЛЛІ»**

Сучасний етап розвитку інженерної освіти вимагає інтеграції традиційних методів навчання з новітніми цифровими технологіями. У курсі гідравліки однією з фундаментальних тем є вивчення рівняння Бернуллі, яке описує закон збереження енергії для потоку рідини. Традиційно дослідження цього закону проводиться на лабораторних стендах, що дозволяють наочно фіксувати зміни п'єзометричного та повного напорів. Однак лише фізичний експеримент не завжди дає повне уявлення про структуру потоку в зонах зміни геометрії

каналу. В роботі ставилось за мету показати можливості, переваги та обмеження гідравлічного і чисельного моделювання гідравлічного стрибка в системах дорожнього водовідведення. Одним із найбільш перспективних шляхів вдосконалення навчального процесу є впровадження методів обчислювальної гідродинаміки (Computational Fluid Dynamics). Використання CFD дозволяє не тільки дублювати натурний експеримент у віртуальному середовищі, але й візуалізувати поля тисків та швидкостей з високою роздільною здатністю, що значно полегшує розуміння фізичних процесів. Метою даної роботи є порівняльний аналіз результатів експериментального дослідження рівняння Бернуллі на лабораторній установці та даних, отриманих за допомогою чисельного моделювання. Такий підхід дозволяє верифікувати результати розрахунків та продемонструвати студентам ефективність сучасного програмного забезпечення для розв'язання практичних задач гідравліки в'язкої рідини.

Актуальність та теоретичні основи Рівняння Бернуллі є одним із основних рівнянь гідравліки, що використовується при розв'язанні практичних задач руху в'язкої рідини [1]. Воно базується на законі збереження енергії та в сукупності з рівнянням нерозривності ( $Q = v \cdot \omega = const$ ) описує стан потоку в різних перерізах. Для потоку в'язкої рідини рівняння має

вигляд:

$$Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{w1-2}$$

Де:

$Z$  — питома потенційна енергія положення (геометрична висота).

$p / \rho g$  — питома потенційна енергія тиску (п'езометрична висота).

$\alpha v^2 / 2g$  — питома кінетична енергія (швидкісний напір).

$h_w$  — втрати напору на подолання сил внутрішнього тертя.

Об'єктом дослідження є потік рідини у трубі змінного перерізу (труба Вентурі). Експериментальна частина виконувалася на гідравлічному стенді, обладнаному багатотрубним п'езометром [2] для фіксації статичного тиску в 9-ти точках за довжиною потоку (рис. 1).

Паралельно було створено цифрову модель установки для проведення чисельного моделювання (CFD). Це дозволило отримати візуалізацію полів тиску (Pressure [Pa]) та швидкості (Velocity [m/s]) (рис. 2).

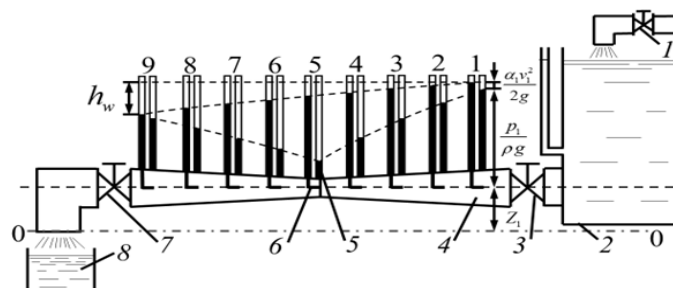


Рисунок 1 – Схема лабораторної установки

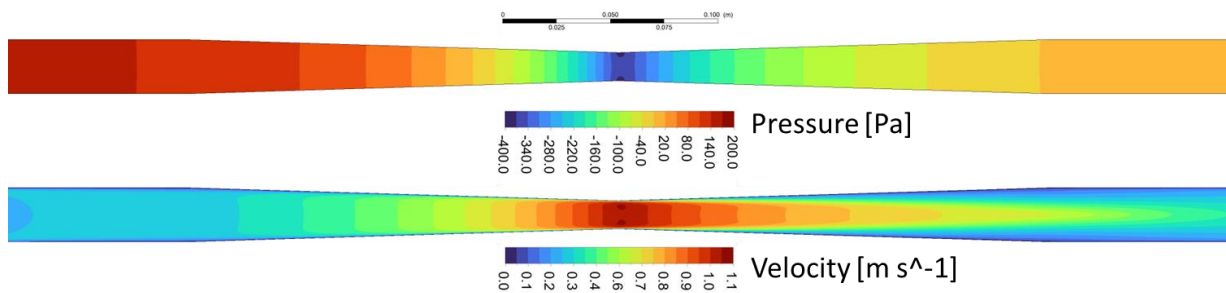


Рисунок 2 – Результати чисельного моделювання

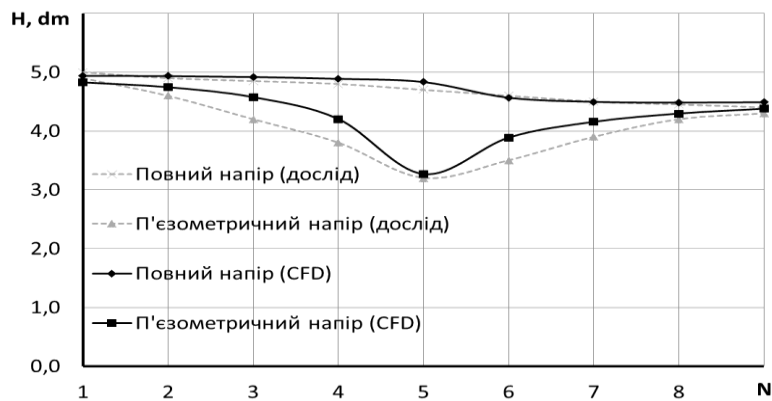


Рисунок 3 – Діаграми рівняння Бернуллі

### Аналіз результатів

За результатами порівняння експериментальних даних та CFD-моделювання встановлено:

**Розподіл тиску:** Найменше значення п'єзометричного напору спостерігається у вузькому перерізі (точка №5), де швидкість потоку є максимальною.

**Лінія напору:** Повний напір поступово зменшується за довжиною труби через гідравлічні втрати ( $h_w$ ).

**Верифікація:** Графіки повного та п'єзометричного напорів, отримані методами CFD, демонструють високу кореляцію з дослідними даними, що підтверджує адекватність обраної математичної моделі (рис. 2).

### Висновки

**Фундаментальна база:** Дослідження підтверджує, що рівняння Бернуллі є фундаментальним законом гідравліки, який базується на законі збереження енергії та нерозривності потоку для нестисненої рідини.

**Порівняння методів:** Графічний аналіз результатів показує високу кореляцію між даними натурального експерименту (дослід) та результатами числового моделювання (CFD):

**Повний напір:** Лінія повного напору в CFD моделі майже збігається з експериментальними точками, плавно знижуючись вздовж потоку через втрати енергії.

П'єзометричний напір: Графіки наочно демонструють падіння статичного тиску (п'єзометричного напору) у звуженій частині труби (переріз №5), де швидкість потоку досягає максимуму, що повністю відповідає закону Бернуллі.

Ефективність CFD: Застосування методів обчислювальної гідродинаміки (CFD) дозволяє з високою точністю візуалізувати поля тиску та швидкостей, що доповнює традиційні лабораторні дослідження та дає змогу детальніше аналізувати структуру потоку.

Цифрова трансформація освіти: Використання професійного програмного забезпечення готує студентів до роботи в сучасних конструкторських бюро, де комп'ютерне моделювання є стандартом проектування перед створенням фізичних прототипів.

Розвиток аналітичних навичок: Порівняння «живого» експерименту з цифровим двійником вчить студентів критично оцінювати точність моделей, розуміти похибки вимірювань та межі застосування теоретичних припущень.

### Література

1. Авершин А. Г. Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Гідравліка і гідропневмопривід» / Андрій Геннадійович Авершин. // Харків: ХНАДУ. – 2021. – 40 с.

2. Біловол О. В., Авершин А. Г. Гідравліка, гідро та пневмоприводи: конспект лекцій / О. В. Біловол, А. Г. Авершин. // Харків: ХНАДУ. – 2023. – 129 с.

*Науковий консультант: Авершин А.Г. доц. каф. деталей машин та ТММ*

Коваленко Станіслав., студент групи А-22-24, Харківський національний автомобільно-дорожній університет

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ РОБОТИ КЛЕПСІДР РІЗНИХ ФОРМ

Клепсидра (грецькою – «викрадач води») – водяний годинник у вигляді посудини переважно циліндричної, конічної або параболоїда четвертого ступіня форми (рис.1), з якої вода витікає через отвір у дні, а її рівень показує час. Відомий з часів ассирійців і вавілонян та Стародавнього Єгипту. Застосовувався до XVII ст. У греків і римлян водяними годинниками простої конструкції вимірювалася тривалість виступів ораторів у суді. Пізніше такі математики, як Галілей, Варіньон, Бернуллі розв'язували задачі стосовно роботи водяних годинників.