

Удосконалення методів визначення коефіцієнта гідравлічного опору з урахуванням просторових характеристик шорсткості трубопроводів

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.009>

Любов Волк

Національний університет водного
господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
l.r.volk@nuwm.edu.ua

Іванна Довбенко

Національний університет водного господарства
та природокористування
м. Рівне, Україна
i.e.dovbenko@nuwm.edu.ua

Анотація - Проаналізовано існуючі підходи до визначення коефіцієнта гідравлічного опору в трубопроводах і окреслено напрями їх удосконалення з урахуванням просторових характеристик шорсткості внутрішньої поверхні. Запропоновано підхід до побудови багатофакторної аналітичної моделі, яка може підвищити точність розрахунків втрат напору в турбулентному режимі. Одержані результати є основою для подальших теоретичних та експериментальних досліджень у напрямі створення універсальної залежності коефіцієнта гідравлічного опору.

Ключові слова: коефіцієнт гідравлічного опору, трубопровід, турбулентний режим, шорсткість, втрати напору.

I. ВСТУП

Гідравлічний опір є ключовим параметром при проектуванні та експлуатації трубопровідних систем, оскільки він визначає величину втрат енергії потоку, а отже – ефективність транспортування робочого середовища. Величина гідравлічного опору залежить від комплексу факторів: геометричних параметрів трубопроводу, фізичних властивостей рідини, режиму руху потоку та стану внутрішньої поверхні труби.

Проблематика визначення коефіцієнта гідравлічного опору активно досліджується з початку XX ст. Значний внесок у її розвиток зробили Г. Блазіус, І. Нікурадзе, К. Коулбрук, Л. Муді, С. Черчілль, Д. Зігранг, Н. Сілвестер та ін. Незважаючи на велику кількість запропонованих аналітичних і емпіричних залежностей [1–5], більшість з них враховує шорсткість внутрішньої поверхні трубопроводу лише через середню висоту виступів k або через відносну еквівалентну шорсткість k/d . Такий підхід спрощує реальні умови течії та не враховує складну структуру пристінного потоку.

II. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ

Класичні моделі, такі як рівняння Блазіуса, Колбрука–Уайта чи апроксимації Муді та Черчілля,

дозволяють оцінити коефіцієнт гідравлічного опору в широкому діапазоні режимів течії. Проте ці моделі побудовані на основі експериментів із трубопроводами, поверхня яких характеризувалася однорідною або рівномірною шорсткістю.

Роботи Й. Нікурадзе (1932–1933) заклали основи розуміння впливу шорсткості на гідравлічний опір, показавши, що перехід від гідравлічно гладкої до квадратичної області опору відбувається поступово та залежить від відносної шорсткості. Проте подальші дослідження показали, що навіть за однакової висоти виступів коефіцієнт опору може суттєво змінюватися залежно від форми та щільності нерівностей.

Аналіз сучасних публікацій свідчить, що більшість емпіричних залежностей мають похибку 5–15 % порівняно з експериментальними даними, особливо в доквадратичній області. Це свідчить про необхідність уточнення підходів до опису шорсткості як багатопараметричної характеристики поверхні.

III. ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ДЛЯ УДОСКОНАЛЕННЯ МОДЕЛІ

Гідравлічний опір у трубопроводах визначається силами тертя між потоком і внутрішньою поверхнею труби, а його величина безпосередньо залежить від структури пристінного шару турбулентного потоку. У класичних підходах до розрахунку коефіцієнта гідравлічного опору враховується переважно середня висота виступів шорсткості або відносна шорсткість ε/d , що не відображає реальної просторової картини взаємодії потоку з нерівностями поверхні. Такий спрощений опис не враховує вплив геометричних параметрів шорсткості на формування турбулентного підшару та характер енергетичних втрат.

Для підвищення точності гідравлічних розрахунків доцільно враховувати комплекс додаткових параметрів, що визначають структуру пристінного шару та механізм утворення вихрових зон. Серед них найбільш суттєвими є:

a) *Густина виступів на одиницю площі.* Збільшення густоти зумовлює інтенсивніше взаємодіяння потоку з поверхнею труби, підвищує частоту виникнення турбулентних пульсацій та посилює обмін імпульсом, що призводить до зростання опору навіть за незмінної висоти виступів.

b) *Форма виступів.* Геометрія нерівностей (гострі, округлі, кутові) впливає на характер обтікання потоком і механізм відриву струменя. Гострі виступи спричиняють раннє відокремлення потоку та розвиток сильних вихрових структур, тоді як округлі елементи забезпечують більш плавну зміну напрямку руху та менші втрати енергії.

c) *Планове розташування виступів.* Регулярне або хаотичне розміщення нерівностей визначає характер просторової структури турбулентності. У випадку регулярного розташування формуються впорядковані вихрові зони, тоді як хаотичне розміщення призводить до стохастичних пульсацій і нерівномірного розподілу енергії в пристінному шарі.

d) *Об'ємні характеристики шорсткості.* Відношення сумарного об'єму виступів до площі внутрішньої поверхні впливає на товщину ламінарного підшару та інтенсивність турбулентного обміну. Зі збільшенням цього параметра зростає рівень енергетичних втрат і змінюється структура течії біля стінки труби.

Урахування перелічених характеристик у математичній моделі дає можливість перейти від традиційного опису виду

$$\lambda = f(\varepsilon/d, Re) \quad (1)$$

до багатфакторної моделі

$$\lambda = f(\varepsilon/d, Re, n, f, p, V/S) \quad (2)$$

де n – густина виступів, f – форма, p – тип розташування, V/S – відношення об'єму виступів до площі поверхні. Такий підхід дозволяє описати вплив шорсткості більш повно і точніше прогнозувати значення коефіцієнта гідравлічного опору.

IV. ОЧІКУВАНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Врахування просторових характеристик шорсткості при визначенні коефіцієнта гідравлічного опору дозволяє очікувати низку важливих наукових і практичних результатів.

1) Зменшення розбіжностей між теоретичними та експериментальними даними. Удосконалена модель забезпечить кращу відповідність розрахункових значень даним натурних і лабораторних вимірювань, що підвищить достовірність гідравлічних розрахунків.

2) Розширення області застосування існуючих залежностей. Уточнені формули будуть придатними для трубопроводів з різними видами покриття, матеріалів і технологічних особливостей, зокрема для сучасних полімерних та багатошарових систем.

3) Підвищення точності оцінювання енергетичних втрат. Більш точне визначення коефіцієнта гідравлічного опору забезпечить оптимальні розрахунки насосного обладнання, правильний підбір діаметрів труб і зменшення витрат енергії в системах транспортування рідин і газів.

4) Формування універсальної розрахункової залежності. Урахування впливу додаткових факторів дозволить створити узагальнену модель, придатну для широкого кола інженерних задач – від проєктування промислових систем до гідротехнічних споруд.

5) Наукове підґрунтя для подальших експериментальних досліджень. Побудова багатфакторної моделі стане основою для експериментальної перевірки впливу окремих характеристик шорсткості та подальшого введення емпіричних поправок до існуючих формул.

Таким чином, перехід від одновимірного опису шорсткості до комплексного багатпараметричного підходу є перспективним напрямом розвитку методів гідравлічного розрахунку. Такий підхід підвищує точність визначення коефіцієнта гідравлічного опору, покращує якість технічних рішень у галузі гідравлічного транспорту рідин і створює підґрунтя для оптимізації енергетичних витрат у трубопровідних системах.

V. ВИСНОВКИ

Існуючі методи визначення коефіцієнта гідравлічного опору не враховують повною мірою складну структуру шорсткості внутрішньої поверхні трубопроводу. Урахування додаткових геометричних параметрів шорсткості дає змогу точніше описати структуру пристінного потоку та підвищити точність гідравлічних розрахунків. Розробка узагальненої багатфакторної моделі є перспективним напрямом подальших теоретичних і експериментальних досліджень у цій галузі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Хлапук М. М., Безусяк О. В., Волк Л. Р. Теоретичні дослідження коефіцієнта гідравлічного опору в гідравлічно гладких трубопроводах. Вісник НУВГП, 2020, №4(92), с. 23–36.
- [2] Волк Л., Довбенко І., Безусяк О. Аналіз існуючих досліджень коефіцієнта гідравлічного опору в трубах. Modeling, Control and Information Technologies, 2024, №7, с. 25–27. DOI: 10.31713/MCIT.2024.004.
- [3] Nikuradse J. Strömungsgesetze in rauhen Röhren. Forsch. Ver. Dtsch. Ing., 1933, №361, с. 1–63.
- [4] Colebrook C.F., White C.M. Experiments with fluid friction in roughened pipes. Proc. Roy. Soc. London, 1937.
- [5] Moody L.F. Friction factors for pipe flow. Trans. ASME, 1947, 66(8), 671–684.