

Аналіз існуючих досліджень коефіцієнта гідравлічного опору в трубах

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.004>

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

Олександр Безусяк

Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
o.v.bezussyak@nuwm.edu.ua

Анотація – Представлено теоретичні дослідження коефіцієнта гідравлічного опору в трубах з однорідною зернистою шорсткістю. Результати дадуть змогу удосконалити залежності для практичних розрахунків трубопроводів.

Ключові слова – область доквадратичного опору, коефіцієнт гідравлічного опору

I. ВСТУП

При розв'язанні гідродинамічних задач виникають питання гідравлічного розрахунку трубопроводів. Рух рідин у трубопроводах відбувається за рахунок різниці геодезичних відміток або за рахунок енергії, яка передається їм при проходженні через насоси. Гідравлічний розрахунок трубопроводу, зазвичай, проводиться для визначення втрат напору та економічного діаметра труб при заданій витраті рідини.

Коефіцієнт гідравлічного опору в координатах $lg(100\lambda) = f(lg Re)$ в залежності від діючих факторів та гідравлічного режиму в межах виділених областей приймає різні значення. Для виявлення закономірностей впливу основних діючих факторів, в межах виділених областей, на значення коефіцієнта гідравлічного опору, вітчизняними та зарубіжними вченими виконано великий обсяг експериментальних та теоретичних досліджень.

II. МЕТОДИ ТА МАТЕРІАЛИ

Предметом наших теоретичних досліджень є отримання загальної математичної моделі для визначення коефіцієнта гідравлічного опору при турбулентному режимі.

Для розробки загального методу кількісного врахування втрат напору в потоці реальної рідини необхідно виявити залежність сил тертя на внутрішній поверхні стінки труби від основних діючих факторів. Такими основними факторами є

густина рідини ρ , динамічна в'язкість μ , гідравлічний радіус потоку R , осереднена висота виступів шорсткості k та середня швидкість потоку \bar{u} [6].

III. РЕЗУЛЬТАТИ

В області гідравлічно гладкого опору коефіцієнт гідравлічного опору залежить лише від числа Рейнольдса (рис. 1).

Згідно з нормативною та довідковою літературою [1-6] для розрахунку коефіцієнта гідравлічного опору для області гідравлічного гладкого опору рекомендовано застосовувати Г. Блазіуса.

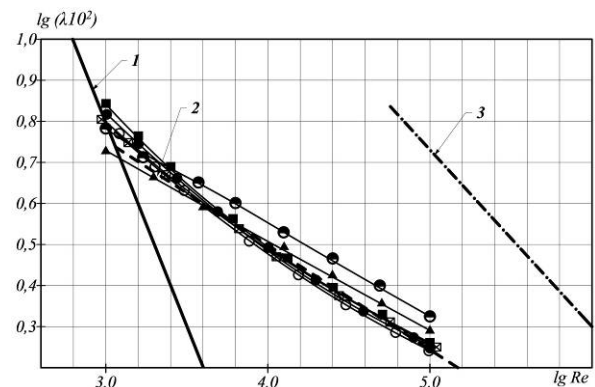


Рисунок 1. Графік залежності коефіцієнта гідравлічного опору від числа Рейнольдса: 1 – ламінарний режим руху потоку; 2 – область гідравлічно гладкого опору (Г. Блазіус); 3 – межа між областями доквадратичного та квадратичного опору; за залежностями: \square - Л. Прандтля, \circ - К. Колбрука; \bullet - П.К. Конакова; \blacksquare - Г.К. Філоненка; \blacktriangle - М.Я. Рузіна; \ominus - Ф.А. Шевельова

На рисунку 2 приведені дослідні точки за даними Й. Нікурадзе в області доквадратичного опору. Ліворуч вони обмежені графіком, який відповідає області гідравлічно-гладкого опору. Праворуч, в

області квадратичного опору, продовжені графіком (горизонтальні лінії) за рівнянням Л.Прандтля.

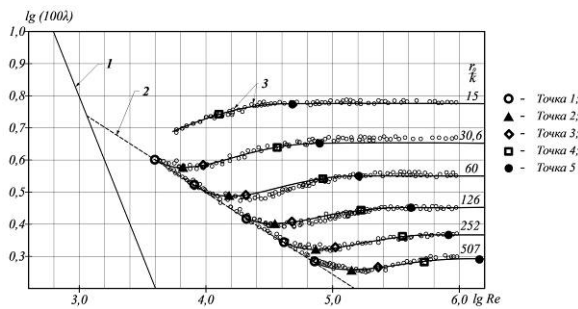


Рисунок 2. Графіки залежності коефіцієнта гідравлічного опору від числа Рейнольдса та гладкості внутрішньої поверхні труб: 1 – ламінарний режим руху потоку; 2 – область гідравлічно-гладкого опору (Г. Блазіус); 3 – дослідні точки (за даними Й. Нікурадзе)

При турбулентному режимі в області доквадратичного руху потоку коефіцієнт гідравлічного опору залежить не тільки від числа Рейнольдса, а і від відносної еквівалентної гладкості внутрішньої поверхні трубопроводу $\lambda = f(Re, r_0/\varepsilon)$.

К. Колбрук у 1937 р. здійснив експерименти на шістнадцяти круглих бетонних трубах та шести трубах діаметром покритих бітумом діаметром від 101,6 мм до 1524 мм із середніми значеннями еквівалентної шорсткості внутрішньої поверхні між 0,04318 мм та 0,254 мм.

Намагаючись класифікувати наявні на той час дані та дані його експерименту, проведеного ним самим та його колегою К. Уайтом у 1937 році, К. Коулбрук (1939 р.) розробив криву, яка аналогічно описувала залежність коефіцієнта гідравлічного опору від числа Рейнольдса, як і графік І. Нікурадзе

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} + \frac{\varepsilon}{3,7d} \right). \quad (1)$$

Рівняння К. Колбрука також можна записати у такому вигляді і воно рекомендоване ним для області квадратичного опору

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1,14 - 2 \lg \left(\frac{\varepsilon}{d} + \frac{9,35}{Re \sqrt{\lambda}} \right). \quad (2)$$

Залежність (2) для визначення коефіцієнта гідравлічного опору включає крім параметра еквівалентної шорсткості, ще й число Рейнольдса, яке характеризує режим потоку в трубопроводі.

Існує багато наближених рішень рівняння К. Колбрука.

У 1947 році Л. Муді запропонував рівняння на основі експериментальних даних, яке відрізнялось від рівняння К. Колбрука у значеннях до 21,49 %

$$\lambda = 0,0055 \left(1 + \left(2 \cdot 10^4 \frac{\varepsilon}{d} + \frac{10^6}{Re} \right)^{\frac{1}{3}} \right). \quad (3)$$

Застосування рівняння (3) рекомендоване Л.Муді у діапазоні чисел Рейнольдса $Re = 4000 \div 5 \cdot 10^6$, й відносної еквівалентної шорсткості $\frac{\varepsilon}{d} = 0 \div 0,01$.

Ф.О. Шевельов дослідив у 1953 р. на гідравлічних та аеродинамічних установках при турбулентному режимі руху води вплив числа Рейнольдса на коефіцієнт гідравлічного опору в сталевих та чавунних трубопроводах.

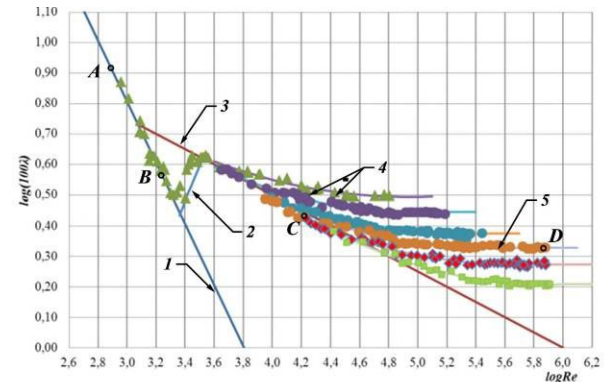


Рисунок 3. Графіки залежності коефіцієнта гідравлічного опору від числа Рейнольдса для нових сталевих трубопроводів (за даними Ф.О. Шевельова): 1 – ламінарний режим руху потоку; 2 – перехідна область; 3 – область гідравлічно гладкого опору (Г. Блазіус); 4 – область доквадратичного опору; 5 – область квадратичного опору

У 1966 році Д. Вуд запропонував рівняння, яке є аналогічне рівнянню Муді

$$\lambda = 0,094 \left(\frac{\varepsilon}{d} \right)^{0,225} + 0,53 \left(\frac{\varepsilon}{d} \right) + 88 \left(\frac{\varepsilon}{d} \right)^{0,44} Re^{-\psi}, \quad (4)$$

де ψ - показник степені $\psi = 1,62 \left(\frac{\varepsilon}{d} \right)^{0,134}$.

Застосування рівняння (4) рекомендоване Д. Вудом у діапазоні $Re = 4000 \div 5 \cdot 10^7$, $\frac{\varepsilon}{d} = 0,00001 \div 0,04$.

Д. Соннад і К. Гудар у 2006 році змінивши підхід до рівняння і застосувавши W-функція Ламберта, здійснили апроксимацію та отримали рівняння

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 0,8686 \ln \left(\frac{0,4587 Re}{G^{G/(G+1)}} \right), \quad (5)$$

де $G = 0,124 Re \frac{\varepsilon}{d} + \ln(0,4587 Re)$.

Рекомендований діапазон застосування рівняння (5) Д. Соннад і К. Гудар у межах $4000 \leq Re \leq 10^8$, $10^{-6} \leq \frac{\varepsilon}{d} \leq 5 \cdot 10^{-2}$.

Також аналогічний підхід здійснили іранські вчені А.Р. Ватанхах (2008) і М. Кучакзаде (2009) та отримали аналогічну залежність.

Д. Бркіч у 2011 році запропонував рівняння шляхом апроксимації даних

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{2,18\beta}{Re} + \frac{\varepsilon}{3,71d} \right), \quad (6)$$

$$\text{де } \beta = \ln \frac{Re}{1,816 \ln \left(\frac{1,1 Re}{\ln(1+1,1 Re)} \right)}.$$

Д. Бркіч рекомендував застосування формули (6) для діапазону $4000 \leq Re \leq 10^8$, $0 \leq \frac{\varepsilon}{d} \leq 5 \cdot 10^{-2}$.

В. Беллос, І. Налбантіс та Д. Тсакітіс у 2018 році опублікували роботу з рекомендацією використовувати для визначення коефіцієнта гідравлічного опору

$$\lambda = \left(\frac{64}{Re} \right)^a \left[0,75 \ln \frac{Re}{5,37} \right]^{2(a-1)b} \left[0,88 \ln 6,82 \frac{d}{\varepsilon} \right]^{2(a-1)(1-b)}, \quad (7)$$

$$\text{де } a = \frac{1}{1 + \left(\frac{Re}{2,712} \right)^{8,4}}; \quad b = \frac{1}{1 + \left(\frac{Re}{150 \frac{d}{\varepsilon}} \right)^{1,8}}.$$

Всі залежності для визначення коефіцієнта гідравлічного опору рекомендовані тільки для певних конкретних умов (матеріал, вид шорсткості поверхні, висота виступів, відстань між ними, їх форма та розташування по поверхні). Адекватну

залежність зміни коефіцієнта гідравлічного опору від всіх основних діючих факторів можна встановити лише дослідним шляхом.

Необхідно відмітити, що графік залежності зміни коефіцієнта гідравлічного опору від числа Рейнольдса розкриває тільки режими руху, але не розкриває структуру потоку, яку необхідно враховувати при гідравлічних розрахунках трубопроводів.

REFERENCES

- [1] Теоретичні дослідження коефіцієнта гідравлічного опору в гідравлічно гладких трубопроводах / М. М. Хлапук, О. В. Безусяк, Л. Р. Волк та ін. // Вісник НУВГП. Технічні науки : зб. наук. праць. - Рівне : НУВГП, 2020. - Вип. 4(92). - С. 23-36.
- [2] Волк Л.Р., Безусяк О.В. та ін. (2021). Удосконалення розрахунку закритої колекторно-дренажної мережі дренажних систем. Меліорація і водне господарство, (1), 98 - 106.
- [3] Nikuradse J. Gesetzmässigkeiten der turbulenten Strömung in glatten Rohren / J. Nikuradse. – Forsch. Arb. Ing. Wes., 1932. – N. 356.
- [4] Nikuradse J. Strömungsgesetze in rauchen Rohren / J. Nikuradse // Forsch. Ver. Dtsch. Ing. – 1933. – N. 361.
- [5] Khlapuk M., Bezusyak O., Volk L., Zhang Z. Theoretical research of friction factor in hydraulically smooth pipes. Second International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters. Volume 280, 2021. P.1-6.
- [6] Volk, L., & Безусяк, О. (2023). Коефіцієнт гідравлічного опору в трубах з однорідною зернистою шорсткістю. Modeling, Control and Information Technologies: Proceedings of International Scientific and Practical Conference, (6), 210–211. <https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.064>.