

Ю.М. КОНСТАНТИНОВ, кандидат технічних наук

О.О. ГІЖА, кандидат технічних наук

Київський національний університет будівництва і архітектури

ОСОБЛИВОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ВТРАТ НАПОРУ В ПЕРЕХІДНІЙ І КВАДРАТИЧНІЙ ОБЛАСТЯХ ОПОРУ

Проведено аналіз існуючих методів розрахунку чавунних та азбестоцементних труб, показано їх недоліки. Запропоновано рекомендації по визначенню гідравлічного коефіцієнта тертя у перехідній області опору в залежності від його значення в області квадратичного опору та числа Рейнольдса.

Ключові слова: границі гладкої; перехідної та квадратичної областей опору; дві зони у перехідній області; відносне число Рейнольдса; гідравлічний коефіцієнт тертя.

Проведен анализ существующих методов расчета чугунных и асбестоцементных труб, показаны их недостатки. Предложены рекомендации по определению гидравлического коэффициента трения в переходной области сопротивления в зависимости от его значения в области квадратичного сопротивления и относительного числа Рейнольдса.

Ключевые слова: границы гладкой; переходной и квадратичной областей сопротивления; две зоны в переходной области; относительное число Рейнольдса; гидравлический коэффициент трения.

The analysis of existing methods of calculating the iron and asbestos cement pipes, showing their flaws. Recommendations for determining the hydraulic coefficient of friction in the transition region of resistance according to its value in the quadratic resistance region and relative Reynolds number are provided.

Keywords: borders smooth; transition and square areas of resistance; two zones in the transition region; the relative Reynolds number; hydraulic coefficient of friction.

В роботі [2] показано, що втрати напору для сталевих труб в перехідній області опору не досить обґрунтовано визначають за відомими експериментальними формулами Альтшуля, Шевелєва тощо. Подібне характерно і для труб з інших матеріалів. Наприклад, на рис.1 і 2 показано дані експериментів [4,3] по визначенню гідравлічних коефіцієнтів тертя λ для азбестоцементних труб $D = 75,8$ мм і нових чавунних труб $D = 51,5$ мм, а також їх підрахунки за формулами Ф.О. Шевелєва:

для азбестоцементних труб

$$\lambda = 0,16 \left(\frac{0,37 \cdot 10^{-6}}{D} + \frac{1}{\text{Re}} \right)^{0,19}, \quad (1)$$

і для нових чавунних труб

$$\lambda = 0,75 \left(\frac{0,55 \cdot 10^{-6}}{D} + \frac{1}{\text{Re}} \right)^{0,284}, \quad (2)$$

А.Д. Альтшуля для будь-яких труб [1]

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta_{\text{екв}}}{D} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25}. \quad (3)$$

В останній формулі значення відносної еквівалентної шорсткості $\frac{\Delta_{\text{екв}}}{D}$ при відомих з дослідів значеннях $\lambda_{\text{кв}}$ у квадратичній області опору були визначені за формулою Б.Л.Шифрінсона [1]

$$\lambda_{\text{кв}} = 0,11 \left(\frac{\Delta_{\text{екв}}}{D} \right)^{0,25}. \quad (4)$$

Так, наприклад, для азбестоцементних труб при $D = 75,8 \text{ мм}$ і $\lambda_{\text{кв}} = 0,0168$ [4], а для нових чавунних при $D = 51,5 \text{ мм}$ і $\lambda_{\text{кв}} = 0,0335$ [3] з (4) маємо

$$\frac{\Delta_{\text{екв}_{\text{азб}}}}{D} = \left(\frac{\lambda_{\text{кв}}}{0,11} \right)^4 = \left(\frac{0,0168}{0,11} \right)^4 = 0,000544,$$

$$\frac{\Delta_{\text{екв}_{\text{чав}}}}{D} = \left(\frac{\lambda_{\text{кв}}}{0,11} \right)^4 = \left(\frac{0,0335}{0,11} \right)^4 = 0,0086.$$

З графіків бачимо, що формули Шевельєва (1) і (2) дають дещо завищені значення гідравлічного коефіцієнта тертя λ в середній частині діапазонів зміни $\ln \text{Re}$, а при відносно невеликих значеннях $\ln \text{Re}$, а також при великих їх значеннях (тобто у квадратичній області опору) ці формули призводять до істотно занижених коефіцієнтів тертя.

Формула Альтшуля (3) дає завищені λ для азбестоцементних труб, а для нових чавунних (рис.1) – істотно занижені. У цьому випадку $\frac{\Delta_{\text{екв}_{\text{чав}}}}{D} \gg \frac{68}{\text{Re}}$ і застосування цієї формули є неправомірним.

В [2] показано, що в перехідній області опору втрати напору залежать не від абсолютних значень чисел Рейнольдса Re (або швидкості V) і деяких числових параметрів, як вважалося раніше [1,3,4,5], а від гідравлічного

коефіцієнта тертя у квадратичній області опору $\lambda_{\text{КВ}}$ і відношення Re до його значення при встановленні вказаної області $Re_{\text{КВ}}$, тобто від $\frac{Re}{Re_{\text{КВ}}}$.

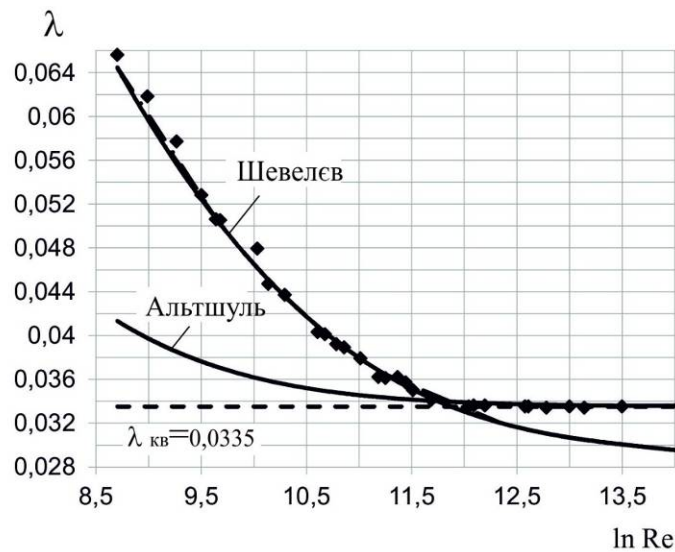


Рис. 1. Експериментальні дані і залежності $\lambda = f(\ln Re)$ для чавунної труби $D = 51,5$ мм за формулами (2) і (3)

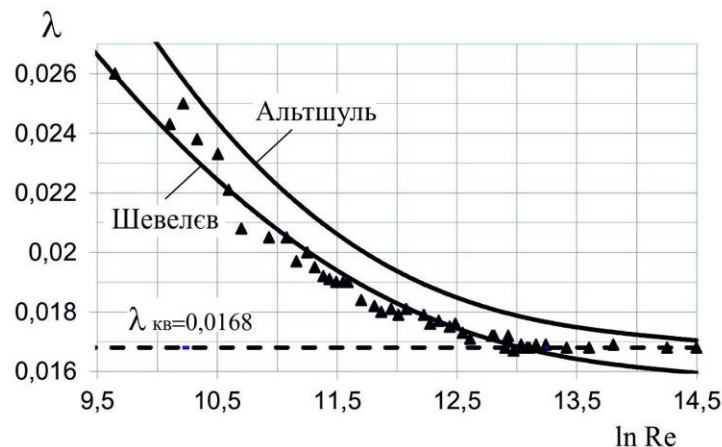


Рис. 2. Експериментальні дані і залежності $\lambda = f(\ln Re)$ для азбестоцементної труби $D = 75,8$ мм за формулами (1) і (3)

Можна вважати, що значення $\lambda_{\text{КВ}}$ і $Re_{\text{КВ}}$ є **базовими факторами** при вивченні гідравлічного коефіцієнта тертя, а формули (1), (2) і (3) не враховують ці обставини, що істотно впливає на визначення втрат напору.

Використовуючи експериментальні дані [3,4], і запропоновану методику [2] для базових факторів стандартних труб, було отримано залежності $\lambda_{\text{КВ}} = f(D)$ (рис.3) і $Re_{\text{КВ}} = f(D)$ (рис.4) у вигляді

$$\lambda_{\text{кв}} = \frac{K}{D^\tau}, \quad (5)$$

$$\text{Re}_{\text{кв}} = ND^\eta, \quad (6)$$

де параметри K , τ , N і η наведені у таблиці 1.

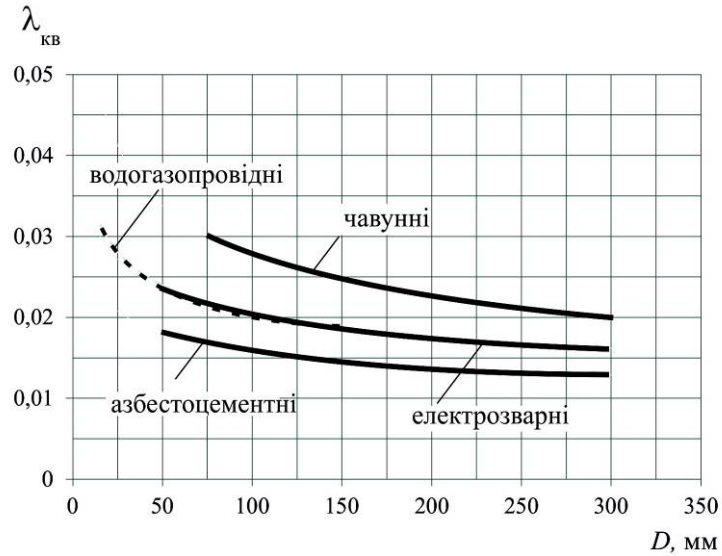


Рис. 3. Залежності $\lambda_{\text{кв}} = f(D)$ для різних типів труб

Таблиця 1

Тип труб	K	τ	N	η
Сталеві водогазопровідні	0,0597	0,2337	5112	0,819
Сталеві електрозварні	0,053	0,2076	7315	0,75
Чавунні	0,1036	0,2864	4782	0,869
Азбестоцементні	0,0384	0,191	11017	0,876

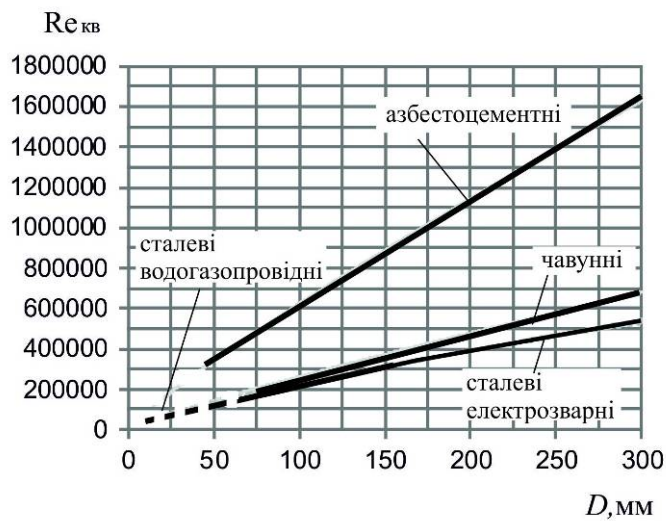


Рис. 4. Залежності $\text{Re}_{\text{кв}} = f(D)$ для різних типів труб

Обробка експериментальних даних для визначення λ згідно з методикою, що наведена в [2], проведена у вигляді:

$$\lambda = \lambda_{\text{КВ}} A \left(\frac{\text{Re}}{\text{Re}_{\text{КВ}}} \right)^B. \quad (7)$$

Встановлено, що для кожного типу труб параметри A і B є сталими. З врахуванням даних для сталевих труб [2] їх значення наведені у таблиці 2.

Таблиця 2

Тип труб	$\text{Re} \approx (0,1 \dots 0,375) \text{Re}_{\text{КВ}}$		$\text{Re} \approx (0,375 \dots 1) \text{Re}_{\text{КВ}}$	
	A	B	A	B
Чавунні	0,926	-0,223	1	-0,0143
Сталеві водогазопровідні	0,925	-0,128	1	-0,0514
Сталеві електрозварні	0,913	-0,14	1	-0,045
Азбестоцементні	0,926	-0,129	1	-0,063
Сталеві і азбестоцементні (усереднені показники)	0,918	-0,137	1	-0,06

Залежності $\lambda = f\left(\lambda_{\text{КВ}}, \frac{\text{Re}}{\text{Re}_{\text{КВ}}}\right)$ за формулою (7), а також експериментальні дані [3,4] для різних типів труб і діаметрів показані на рис.5 і 6.

Як і для сталевих труб [2], у перехідній області опору для чавунних і азбестоцементних труб простежуються дві характерні зони. При $\text{Re} \approx (0,375 \dots 1) \text{Re}_{\text{КВ}}$ має місце напівшорстка зона, де λ збільшується дуже повільно при зменшенні $\text{Re}/\text{Re}_{\text{КВ}}$. При $\text{Re} \approx (0,1 \dots 0,375) \text{Re}_{\text{КВ}}$ має місце напівгладка зона, де λ зростає більш помітно при зменшенні $\text{Re}/\text{Re}_{\text{КВ}}$.

За даними Ф.О.Шевельєва [4] при дослідженні втрат напору в азбестоцементній трубі діаметром $D = 278,0$ мм потужність аеродинамічної установки була недостатньою, тому залежності (5) для $\lambda_{\text{КВ}}$ і (6) для $\text{Re}_{\text{КВ}}$ в цьому випадку отримано шляхом екстраполяції, а експериментальні дані (рис.5) показані в діапазоні $\text{Re}/\text{Re}_{\text{КВ}} \leq 0,5$.

Треба також відзначити, що для чавунних труб (у яких відносна еквівалентна шорсткість $\Delta_{\text{екв}}/D$ значно більша, ніж у сталевих і азбестоцементних) зростання λ при зменшенні $\text{Re}/\text{Re}_{\text{КВ}}$ проходить більш помітно у порівнянні з іншими трубами (див. рис.6)

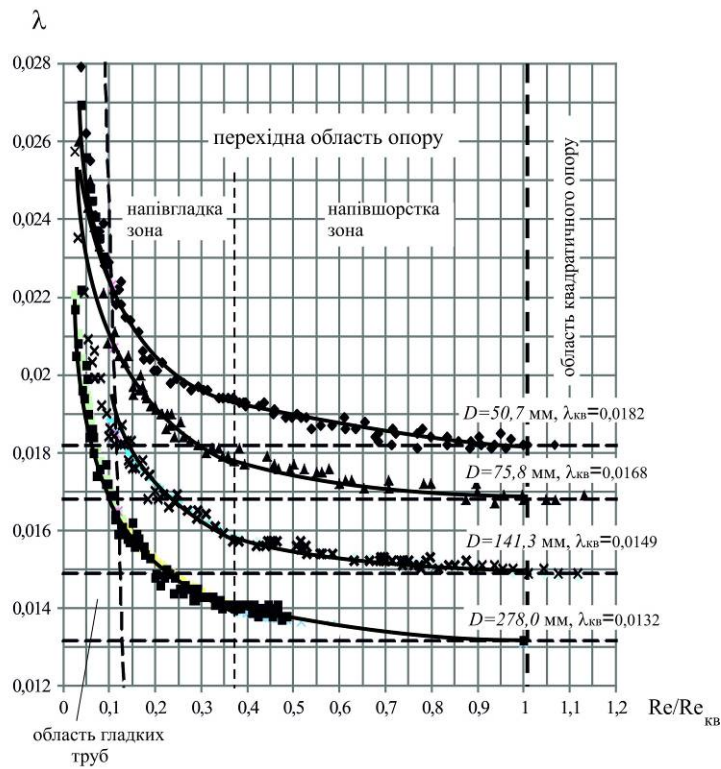


Рис. 5. Залежності $\lambda = f(\text{Re}/\text{Re}_{\text{кв}})$ за формулою (7) і дані експериментів для азбестоцементних труб $D = 50,7$ мм (\blacklozenge), $D = 75,8$ мм (\blacktriangle), $D = 141,3$ мм (\blacktimes), $D = 278,0$ мм (\blacksquare)

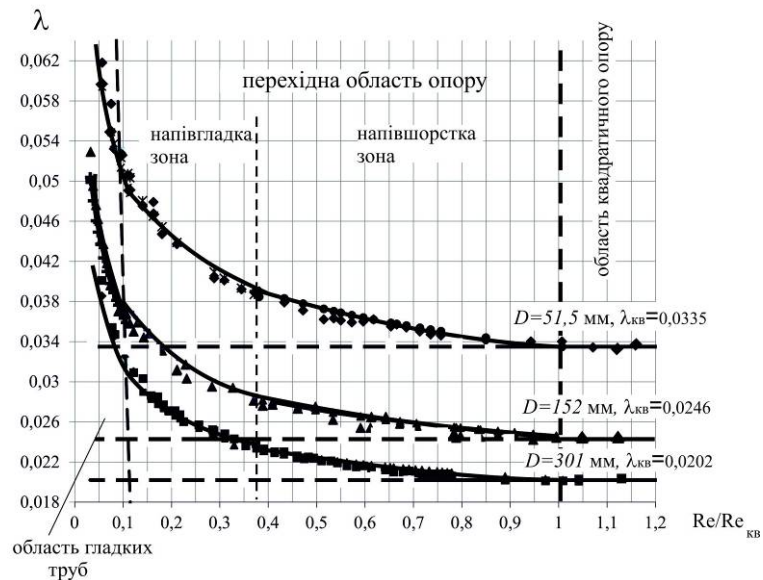


Рис. 6. Залежності $\lambda = f(\text{Re}/\text{Re}_{\text{кв}})$ за формулою (7) і дані експериментів для чавунних труб $D = 51,5$ мм (\blacklozenge), $D = 152,0$ мм (\blacktriangle), $D = 301,0$ мм (\blacksquare)

З графіків бачимо, що залежність (7) і базові фактори $\lambda_{\text{КВ}}$ і $\text{Re}_{\text{КВ}}$ досить ґрунтовно характеризують особливості визначення гідравлічного коефіцієнта тертя λ . Формули (1), (2), (3), (4) ці фактори не враховують, що може призвести до істотних помилок у розрахунках.

Визначимо також, що в перехідній області опору при $\text{Re} < \text{Re}_{\text{КВ}}$ (тобто при $\frac{\text{Re}}{\text{Re}_{\text{КВ}}} < 1$) гідравлічний коефіцієнт тертя λ можна визначати за формулою

$$\lambda = k_{\text{П}} \lambda_{\text{КВ}}, \quad (8)$$

де $k_{\text{П}}$ – коефіцієнт збільшення λ у перехідній області, що дорівнює

$$k_{\text{П}} = A \left(\frac{\text{Re}}{\text{Re}_{\text{КВ}}} \right)^B. \quad (9)$$

Значення $k_{\text{П}}$ за формулою (9) з врахуванням даних табл. 2 для азбестоцементних, сталевих водогазопровідних і електрозварних труб, майже не відрізняються між собою, і тому для таких труб можна користуватися усередненими параметрами, які наведені в тій самій таблиці. У цьому випадку коливання значень $k_{\text{П}}$ для вказаних типів труб буде не більше 1%. Відповідні графіки показані на рис.7.

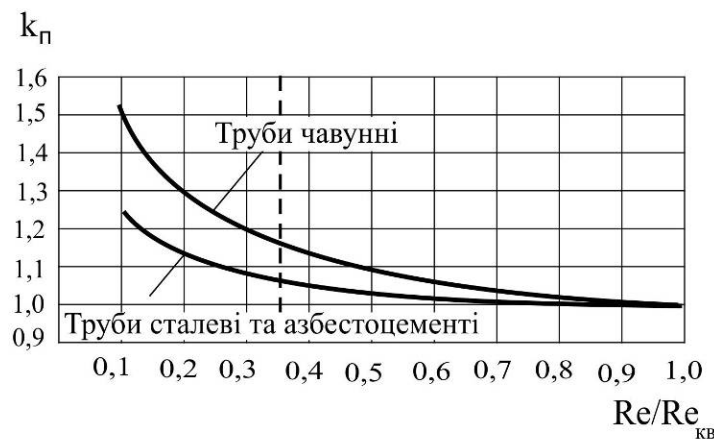


Рис. 7. Коефіцієнт збільшення втрат напору $k_{\text{П}} = f(\text{Re}/\text{Re}_{\text{КВ}}$, тип труб) у перехідній області опору

Нижня межа перехідної області опору визначається за формулами Ф.А.Шевелєва:

для чавунних труб

$$\lambda_{\text{ГЛ}} = 0,77 / \text{Re}^{0,284}, \quad (10)$$

для азбестоцементних труб

$$\lambda_{\text{ГЛ}} = 0,165 / \text{Re}^{0,19}. \quad (11)$$

Лінії, що з'єднують точки перетину цих залежностей у вигляді $\lambda_{\text{ГЛ}} = f(\text{Re}/\text{Re}_{\text{КВ}})$ з кривими, що побудовані за формулою (7) для відповідних труб, утворюють межу областей гладких труб, які теж показані на рис. 5 і 6 пунктиром. Необхідно відзначити, що кути, які утворюються між кривими, побудованими за залежностями (7) і (10), а також між (7) і (11), настільки незначні, що в діапазоні $\text{Re} \approx (0,09 \dots 0,12) \text{Re}_{\text{КВ}}$ підрахунки λ за формулами для гладкої і перехідної областей практично не відрізняються і можна вважати для всіх випадків

$$\text{Re}_{\text{ГЛ}} \approx 0,1 \text{Re}_{\text{КВ}}. \quad (12)$$

У гідравлічній літературі не наводяться дані щодо детальних досліджень опорів для інших видів труб. Але існують рекомендації [5,6] стосовно того, що характер опорів для деяких видів труб є подібним до опорів в азбестоцементних трубах. І тоді в формулу (8) замість коефіцієнта $k_{\text{П}}$ необхідно вводити коефіцієнт $k'_{\text{П}} = \theta k_{\text{П}}$.

Значення θ приймають:

для труб залізобетонних віброгідропресованих, металевих з внутрішнім полімерним покриттям, що нанесено методом набризгування з заглажуванням $\theta = 1,43$;

для труб залізобетонних центрифугованих і металевих з внутрішнім цементнопіщаним покриттям, що нанесено методом центрифугування $\theta = 1,26$;

для металевих труб з внутрішнім полімерним покриттям, що нанесено методом центрифугування $\theta = 1$.

Необхідно також відмітити, що згідно з [5,6], у практичних розрахунках значення гідравлічного коефіцієнта тертя збільшуються шляхом помноження на коефіцієнти $k_1 = 1,15$ (враховує якість прокладання труб у виробничих умовах) і $k_2 = 1,18$ (враховує вплив стиків у сталевих трубах).

Список літератури

1. *Альтшуль А.Д.* Гидравлические сопротивления. – М.: «Недра», 1982. – 224 с.
2. *Константинов Ю.М., Гіжа О.О.* Сучасний підхід до визначення гідравлічних опорів в трубопроводах / Ю.М. Константинов, О.О. Гіжа // наук.-техн. зб. «Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки». – К.; КНУБА, 2013. – Вип. 21. – С. 155-164.
3. *Шевелев Ф.А.* Исследование основных гидравлических закономерностей турбулентного движения в трубах. – М.: Госстройиздат, 1953. – 208 с.
4. *Шевелев Ф.А.* Гидравлический расчет асбестоцементных труб. – М.: Госстройиздат, 1954. – 68 с.
5. *Шевелев Ф.А., Шевелев А.А.* Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб. Справочное пособие. – М.: Бастет, 2007. – 350 с.
6. *Водоснабжение.* Наружные сети и сооружения. СНиП 2.04.02-84*.