

Ю.М. КОНСТАНТИНОВ, кандидат технічних наук  
О.О. ГІЖА, кандидат технічних наук  
Київський національний університет будівництва і архітектури

## СУЧАСНИЙ ПІДХІД ДО ВИЗНАЧЕННЯ ГІДРАВЛІЧНИХ ОПОРІВ У ТРУБОПРОВОДАХ

*Наведено аналіз існуючих методів розрахунку, показані їх недоліки. Встановлено, що в перехідній області опору необхідно виділяти дві різні зони: напівгладку і напівшорстку, у яких по-різному визначаються гідравлічні коефіцієнти тертя з переважаючим впливом або числа Рейнольдса або відносної еквівалентної шорсткості труби.*

**Ключові слова:** перехідна область опору; напівгладка і напівшорстка зони; відносна еквівалентна шорсткість; границі областей опору; гідравлічний коефіцієнт тертя.

*Приведен анализ существующих методов расчета, показаны их недостатки. Установлено, что в переходной области сопротивления необходимо выделять две разные зоны: полугладкую и полужероховатую, в которых по-разному определяются гидравлические коэффициенты трения с преобладающим влиянием или числа Рейнольдса или относительной эквивалентной шероховатости трубы.*

**Ключевые слова:** переходная область сопротивления; полугладкая и полужероховатая зоны; относительная эквивалентная шероховатость; границы областей сопротивления; гидравлический коэффициент трения.

*An analysis of existing methods of calculation, show their weakness. Found that in the transition region of resistance should be allocated two different zones: the semismooth and semiroughnes in which different definitions hydraulic coefficient of friction with the predominant influence of the Reynolds number or the relative equivalent roughness.*

**Keywords:** transition area of resistance; semismooth and semiroughnes zones; relative equivalent roughness; the boundaries of region of resistance; hydraulic coefficient of friction.

**Існуючі рекомендації.** При проектуванні і розрахунку трубопроводів різного призначення особливе значення має визначення втрат напору (або тиску) у трубопроводі по довжині, що істотно впливає на його пропускну здатність. Існують різні рекомендації [1], [2], [3] для визначення втрат напору. У багатьох випадках рух рідини у трубах відбувається у перехідній області опору, і тільки при малих швидкостях з невеликою відносною еквівалентною

шорсткістю  $\left(\frac{\Delta_{\text{екв}}}{D}\right)$  має місце область гідравлічно гладких труб, а при значних швидкостях і відносних еквівалентних шорсткостях – область шорстких труб. Для перехідної області гідравлічний коефіцієнт тертя визначається за формулами Кольбука-Уайта

$$\lambda = \frac{0,25}{\left[\lg\left(\frac{2,51}{\text{Re}\sqrt{\lambda}} + \frac{\Delta_{\text{екв}}}{3,7D}\right)\right]^2}, \quad (1)$$

або А.Д.Альтшуля [1]:

$$\lambda = 0,11\left(\frac{68}{\text{Re}} + \frac{\Delta_{\text{екв}}}{D}\right)^{0,25}. \quad (2)$$

Перша з формул враховує роботи багатьох дослідників на різних трубах і вважається достатньо точною, друга спрощує розрахунки і призводить практично до тих самих результатів. До речі, формула (2) при  $\left(\frac{\Delta_{\text{екв}}}{D} \gg \frac{68}{\text{Re}}\right)$  перетворюється у формулу Б.Л.Шифрінсона [1] для шорстких труб:

$$\lambda_{\text{кв}} = 0,11\left(\frac{\Delta_{\text{екв}}}{D}\right)^{0,25}, \quad (3)$$

а при  $\left(\frac{\Delta_{\text{екв}}}{D} \ll \frac{68}{\text{Re}}\right)$  – у формулу Блазіуса [1] для гладких труб:

$$\lambda_{\text{гл}} = \frac{0,316}{\text{Re}^{0,25}}. \quad (4)$$

Для водопровідних труб широко застосовуються таблиці Ф.А.Шевелева [3], які ґрунтуються на його формулах [2]:

$$\lambda = \frac{m}{D^n} \left(1 + \frac{f}{V}\right)^n \quad (5)$$

Такі формули отримано тільки для води з кінематичною в'язкістю  $\nu = 0,013 \text{ см}^2/\text{с}$  (при температурі  $t \approx 10^\circ\text{C}$ ). Але вони можуть бути приведені до безрозмірного вигляду і застосовуватися для інших рідин:

$$\lambda = \frac{m}{D^n} \left(1 + \frac{f}{V}\right)^n = m \left(\frac{1}{D} + \frac{68fv}{68VD\nu}\right)^n = m \left(\frac{f}{0,884 \cdot 10^{-4}}\right)^n \left(\frac{0,013 \cdot 10^{-4}}{Df} + \frac{68}{\text{Re}}\right)^n. \quad (6)$$

Формули (2), (5) і (6) не враховують вплив стиків на опори у трубах. У формулі (2) передбачається залежність  $\lambda$  від  $\Delta_{\text{екв}}$ , але рекомендації [1], для її визначення неконкретні і наводяться у дуже широких межах.

У формулах (5) і (6) параметри  $m, f, n$  залежать тільки від матеріалу труб, але вони також не враховують значення  $\Delta_{\text{екв}}/D$ , що істотно впливає на отримані результати. Завдяки дослідженням Ф.А.Шевелєва накопичено великий об'єм експериментальних даних [2], але є ще багато невизначеного стосовно втрат напору і пропускної здатності трубопроводів. Невідомо, як розраховувати труби з різних матеріалів при інших  $\Delta_{\text{екв}}/D, \nu, Re_{\text{кв}}$  і  $\lambda_{\text{кв}}$ . Слід зазначити, що в трубах відносно малих діаметрів числа  $Re_{\text{кв}}$  встановлюються в межах від кількох тисяч до десятків тисяч, а у трубах великих діаметрів  $Re_{\text{кв}}$  досягають сотень тисяч і навіть мільйонів.

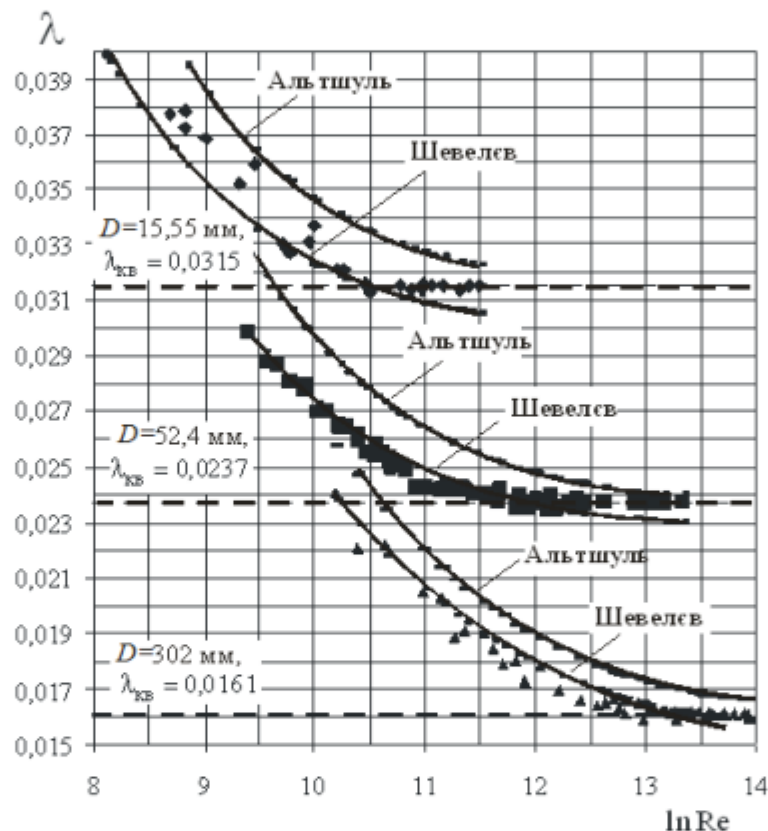
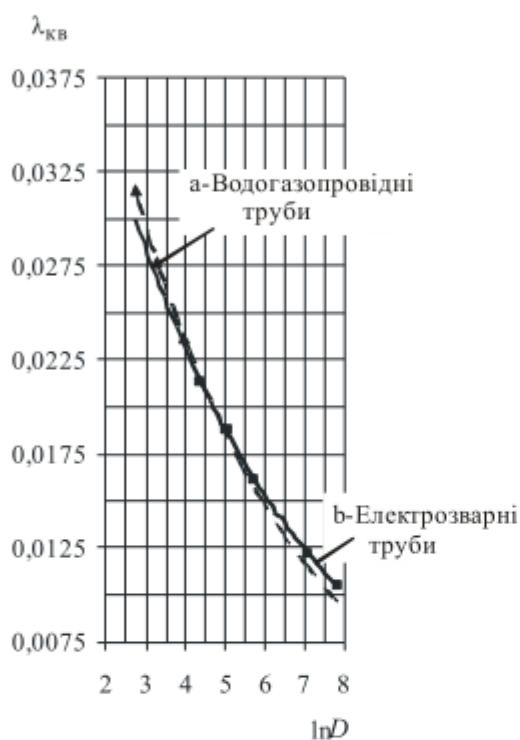


Рис.1. Експериментальні значення  $\lambda$  у порівнянні з формулами (2) і (6).

Звичайно, потоки рідини в цих випадках характеризуються різними значеннями кінетичної енергії і кількості руху, що не може не впливати на особливості гідравлічних опорів.

Як приклад, на рис.1 показані результати досліджень залежності  $\lambda = f(\ln Re)$  для сталевих труб з діаметрами  $D = 15,55 \text{ мм}$ ,  $D = 52,4 \text{ мм}$  і  $D = 302 \text{ мм}$ , у порівнянні їх з формулами (2) і (6). В цьому випадку значення  $\lambda_{\text{кв}}$  отримані з роботи [2], а  $\Delta_{\text{екв}}/D$  підраховані за формулою (3). З графіків бачимо, що підрахунки  $\lambda$  за формулою (2) призводять до значного запасу, і криві  $\lambda = f(\ln Re)$  досягають значення  $\lambda_{\text{кв}}$  при числах  $Re \gg Re_{\text{кв}}$ .

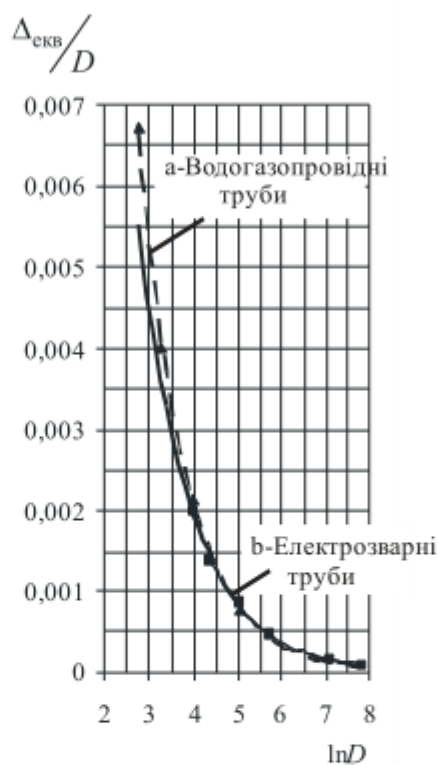
Формула (6) при  $D=15,55\text{мм}$  показує занижені значення  $\lambda$  в усьому діапазоні зміни чисел  $Re$ , а при  $D=52,4\text{мм}$  – тільки у діапазоні  $\ln Re \geq 12$  ( $Re \geq 160000$ ), і завищені значення  $\lambda$  при  $\ln Re \approx 10..12$  ( $Re \approx 22000..160000$ ). При збільшенні діаметра труби до  $D=302\text{мм}$  майже в усьому діапазоні зміни  $Re$  ця формула призводить до завищених значень  $\lambda$ , і тільки при  $\ln Re \geq 13,3$  ( $Re \geq 600000$ ) – до занижених. Тобто, можна вважати, що згідно формули (6), при подальшому збільшенні діаметрів труби буде продовжуватися тенденція встановлення завищених значень  $\lambda$ .



$$a - \lambda_{KB} = 0,0597 e^{-0,2337 \ln D}$$

$$b - \lambda_{KB} = 0,053 e^{-0,2077 \ln D}$$

Рис.2. Залежності  $\lambda_{KB} = f(D)$  для сталевих труб



$$a - \Delta_{KB}/D = 0,0866 e^{-0,9346 \ln D}$$

$$b - \Delta_{KB}/D = 0,0539 e^{-0,8307 \ln D}$$

Рис.3. Залежності  $\Delta_{KB}/D = f(D)$  для сталевих труб

**Визначення області квадратичних опорів і значень  $\lambda_{KB}$  і  $Re_{KB}$ .**  
 Технічні труби кожного типу виробляються згідно державних стандартів. Наприклад, як водогазопровідні (ГОСТ 3262-75), так і електрозварні (ГОСТ 10704-91, ГОСТ 8696-74) мають свої особисті характеристики гідравлічних опорів. Тому, при відомих з [2] значеннях  $\lambda_{KB}$  і  $D$  можна отримати залежності  $\lambda = f(D)$  для сталевих труб, які показані на рис.2, потім, користуючись формулою (3), визначити значення  $\Delta_{KB}/D = f(D)$ , що показані на рис.3. Тут враховано також наближені дані натурних досліджень

електрозварних труб з  $D = 600 \text{ мм}$  і  $D = 1200 \text{ мм}$  [2]). В діапазоні досліджень таких труб при  $D = 15,55 \dots 302 \text{ мм}$  значення  $\Delta_{\text{екв}}/D$  зменшуються більш, ніж у 14 разів, а  $\Delta_{\text{екв}}$  збільшується майже на 40%), а при подальшому збільшенні діаметрів  $\Delta_{\text{екв}}$  може збільшуватися навіть удвічі.

Згідно залежностей на рис. 2  $\lambda_{\text{КВ}}$  визначається за формулою:

$$\lambda_{\text{КВ}} = \frac{T}{e^{J \ln D}}, \quad (7)$$

де  $T = 0,0597$ ,  $J = 0,2337$  – для водогазопровідних труб, і  $T = 0,053$ ,  $J = 0,2077$  – для електрозварних труб.

Наведений аналіз підтверджує, що нехтування впливом відносної шорсткості  $\Delta_{\text{екв}}/D$  може призвести до істотної помилки при визначенні  $\lambda$ .

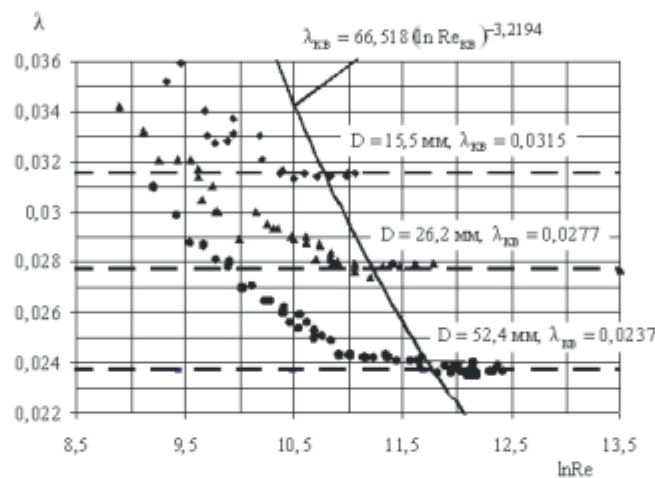


Рис.4. Визначення області квадратичних опорів для водогазопровідних труб

Для подальшого аналізу доцільно встановити залежності  $Re_{\text{КВ}} = f(\lambda_{\text{КВ}})$  по точках з чисельних дослідів А.Ф.Шевелева, де значення  $\lambda = f(\ln Re)$  (рис. 4 і рис.5) припиняють зниження і залишаються сталими при подальшому зростанні  $Re$ . Оскільки  $\lambda$  наближається до  $\lambda_{\text{КВ}}$  асимптотично, то можна вважати, що квадратична область встановлюється при  $\lambda = (1,005 \dots 1)\lambda_{\text{КВ}}$ .

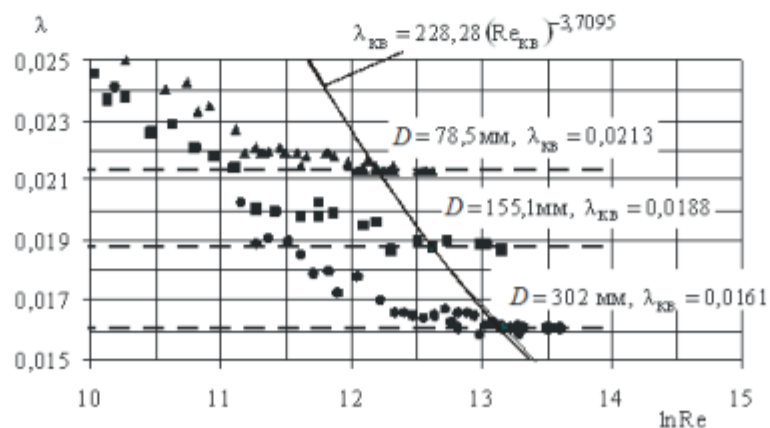


Рис.5. Визначення області квадратичних опорів для електрозварних труб

Враховуючи формули для  $\lambda_{\text{КВ}}$ , які показані на рисунках, можна отримати залежності  $Re_{\text{КВ}} = f(\lambda_{\text{КВ}})$  (рис.6) для труб різних типів і діаметрів при відповідних значеннях  $\lambda_{\text{КВ}}$ , що наведені у [3].

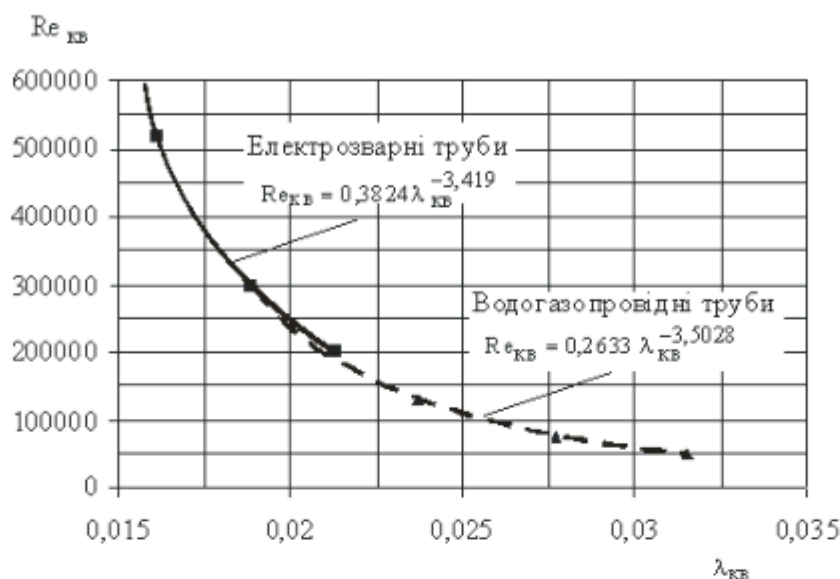


Рис.6. Залежності  $Re_{\text{КВ}} = f(\lambda_{\text{КВ}})$  для різних типів труб

Для водогазопровідних і електрозварних труб числа  $Re_{\text{КВ}}$  дещо відрізняються, але для практичних розрахунків можна приймати:

$$Re_{\text{КВ}} \approx \frac{0,3824}{\lambda_{\text{КВ}}^{3,419}} \quad (8)$$

Ці значення  $Re_{\text{КВ}}$  близькі до рекомендацій Шевелєва [2], але істотно менші, ніж у рекомендаціях А.Д.Альтшуля [1], у яких не було враховано умови, що при  $\lambda = (1,005 \dots 1)\lambda_{\text{КВ}}$  має бути і  $Re \approx Re_{\text{КВ}}$ .

**Дослідження гідравлічного коефіцієнта тертя у перехідній області опору.** На наш погляд, характеристики опорів у перехідній області необхідно зв'язувати із відношеннями конкретних чисел Рейнольдса потоку в трубі  $Re$  до їх значення  $Re_{\text{КВ}}$  на межі перехідної і квадратичної областей опору, та визначати гідравлічний коефіцієнт тертя  $\lambda$  також в залежності від його значення  $\lambda_{\text{КВ}}$  у квадратичній області опору. Тому надалі обробка всіх експериментальних даних проводиться у вигляді залежностей відносних величин  $\lambda/\lambda_{\text{КВ}} = f(Re/Re_{\text{КВ}})$ . Значення  $\lambda_{\text{КВ}}$  для різних труб отримано з [2].

Для кожної труби побудовано графіки  $\lambda/\lambda_{\text{КВ}} = f(Re/Re_{\text{КВ}})$ . Як приклад, показані такі залежності для сталевих водогазопровідних труб з  $D = 52,4$  мм (рис.7) і електрозварних труб з  $D = 302$  мм (рис. 8).



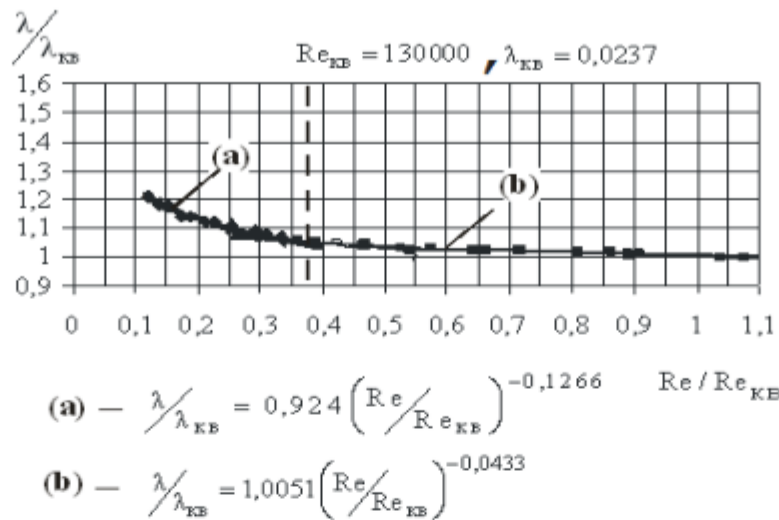


Рис.7. Експериментальні дані і узагальнені формули для водогазопровідної труби  $D = 52,4$  мм

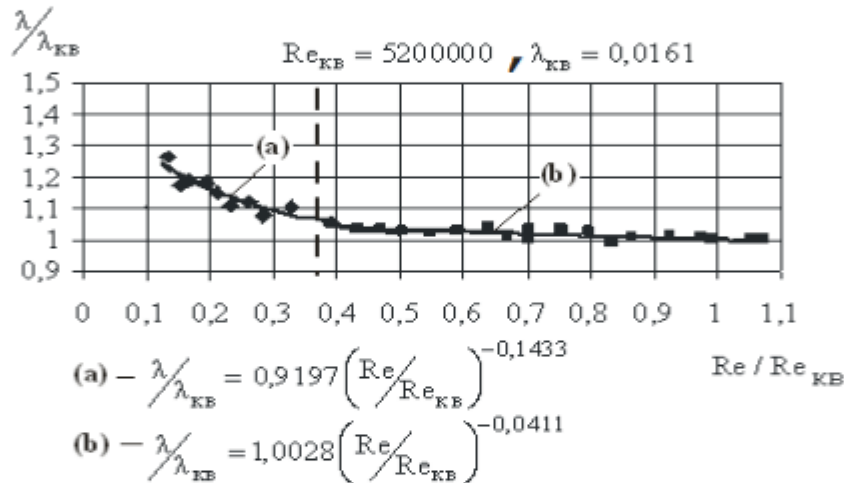


Рис.8. Експериментальні дані і узагальнені формули для електрично зварної труби  $D = 302$  мм

Аналогічні результати отримано також для труб з діаметрами 15,55 мм, 52,4 мм, 78,5 мм і 155,1 мм. Аналіз цих даних показує, що в межах перехідної області опору існують дві якісно різні зони. При  $Re \approx (0,1...0,375) Re_{KB}$   $\lambda$  суттєво збільшується у порівнянні з  $\lambda_{KB}$  (до 25%). В цій зоні на  $\lambda$  істотно впливає число  $Re$ , а також  $\lambda_{KB}$  і  $Re_{KB}$ . Тому цю зону можна умовно назвати напівгладкою. При числах  $Re \approx (0,375...1) Re_{KB}$ , де  $\lambda$  змінюються відносно мало (до 5%), на його величину більше впливає  $\lambda_{KB}$  і менше впливають числа  $Re$  і  $Re_{KB}$ . Цю зону можна назвати напівшорсткою. Наведені залежності можуть описуватися такими формулами:

$$\text{при } Re \approx (0,1...0,375) Re_{KB}: \quad \lambda = \lambda_{KB} A \left( \frac{Re}{Re_{KB}} \right)^{-B_1}, \quad (9)$$

при  $Re \approx 0,375 \dots 1) Re_{KB}$ : 
$$\lambda = \lambda_{KB} \left( \frac{Re}{Re_{KB}} \right)^{-B_2} . \quad (10)$$

Значення параметрів  $A, B_1, B_2$  для труб одного типу мало змінюються і можуть бути осередненими. Для водогазопровідних труб можна приймати:  $A = 0,925, B_1 = -0,128, B_2 = -0,0514$ . Для електрозварних труб:  $A = 0,913, B_1 = -0,14, B_2 = -0,045$ .

**Визначення області гладких труб.** Відомо, що для області гладких труб коефіцієнт  $\lambda_{ГЛ}$  визначається за формулою Блазіуса (4). Ці криві (відносно більш круті) для різних  $Re_{KB}$  показані на (рис.9).

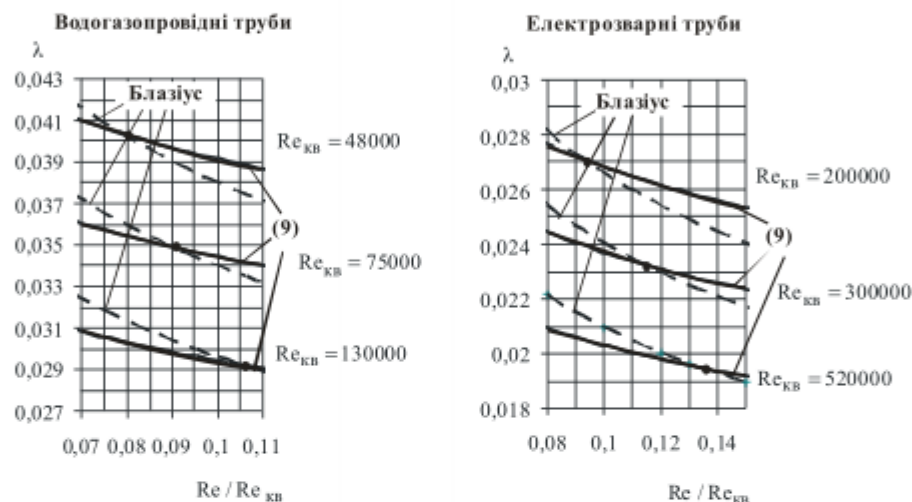


Рис.9. Визначення граничних точок для області гладких труб

На цих графіках для кожного типу і діаметра труби при відповідних тих самих значеннях  $Re_{KB}$  також показані (з меншим похилом) залежності  $\lambda_{ГЛ} = f\left(\frac{Re}{Re_{KB}}\right)$  за формулами (9). Точки перетину кривих за формулами (4) і (9) з однаковими значеннями  $\frac{Re}{Re_{KB}}$  дозволяють визначити межу області гідравлічно гладких труб  $\frac{Re_{ГЛ}}{Re_{KB}}$  для відповідного  $Re_{KB}$ . Звідси можна отримати залежності  $Re_{ГЛ} = f(Re_{KB})$ , що показані на рис. 10, які дещо відрізняються для електрозварних і водогазопровідних труб. Враховуючи, що водогазопровідні труби мають відносно малі значення  $Re_{ГЛ}$ , то можна для всіх сталевих труб приймати:

$$Re_{ГЛ} = 0,127 Re_{KB} . \quad (11)$$



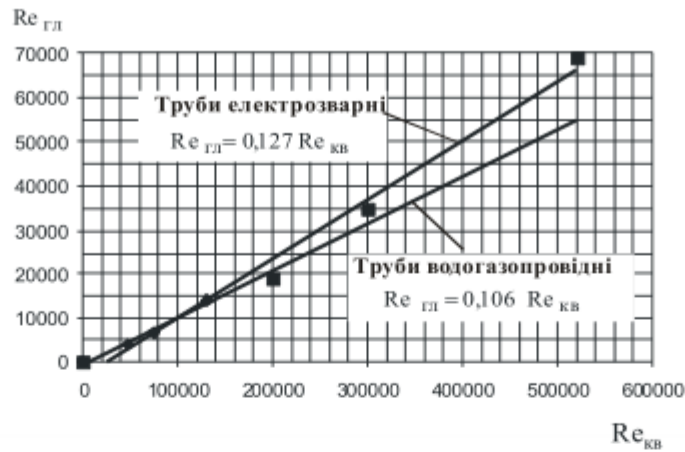


Рис.10. Залежності  $Re_{ГЛ} = f(Re_{КВ})$  для різних типів труб

**Порівняння запропонованих формул з даними експериментів.**

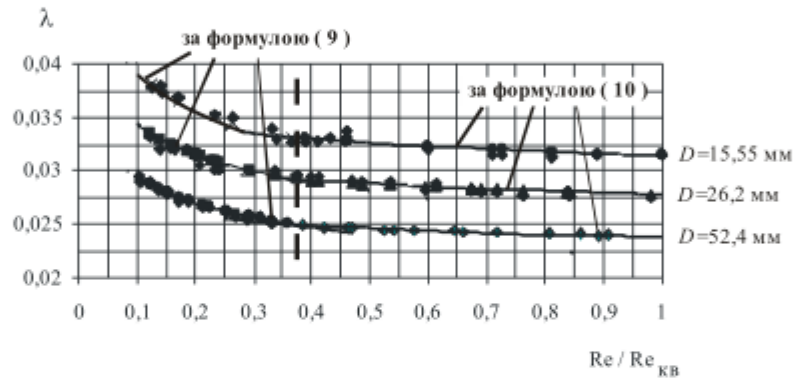


Рис.11. Залежності (9) і (10) і дані експериментів для водогазопровідних руб

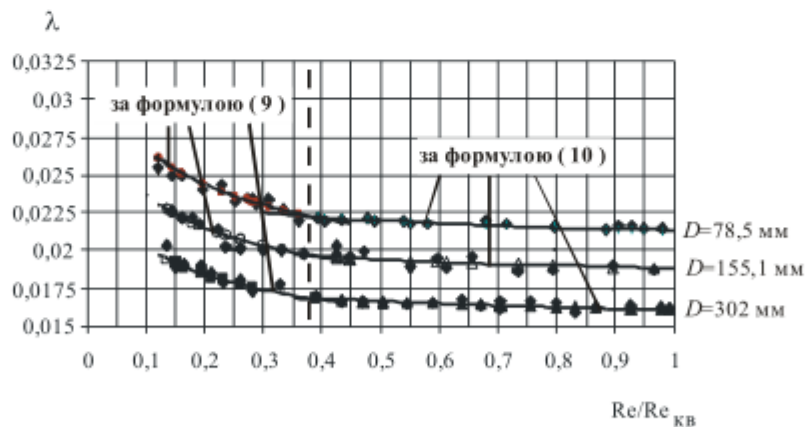


Рис.12. Залежності (9) і (10) і дані експериментів для электроварних труб

Як приклади, наводяться значення  $\lambda$  за формулами (9) і (10) для водогазопровідних (рис.11) та электроварних труб (рис.12) і експериментальні точки за даними А.Ф.Шевелева [2]. Графіки показують, що запропоновані залежності, на відміну від формул (2) і (6), достатньо добре

співпадають з експериментальними даними, а також більш якісно відображають характер зміни гідравлічного коефіцієнта тертя у перехідній області опорів і вплив на нього величин  $\lambda_{кв}$ ,  $Re_{кв}$  і  $Re$ .

#### Зауваження щодо розрахунків труб великих діаметрів.

В якості приклада розглянемо визначення гідравлічного коефіцієнта тертя  $\lambda$  для сталеві труби  $D = 2500$  мм при швидкостях  $V \leq 2,5$  м/с.

Будуємо графіки  $\lambda = f(Re)$  (рис.13) за формулами (2), (6), (9) і (10).

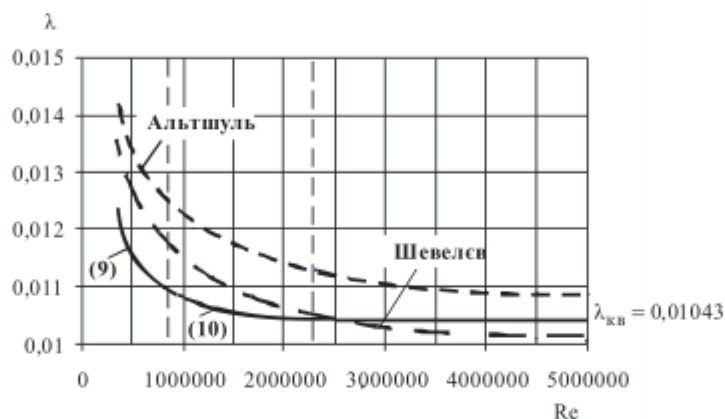


Рис.13. Залежності  $\lambda = f(Re, \lambda_{кв})$  для  $D = 2500$  мм за формулами 9-10, 2, 6

З графіків бачимо, що формула (2) дає завищені (від 5 до 14%) значення  $\lambda$ , а формула (6) завищені (до 10%) тільки при числах  $Re \leq 2300000$  і занижені при  $Re \geq 2300000$  (тобто при  $Re \geq Re_{кв}$ ). До речі, в [3] стверджується, що нові сталеві труби практично завжди працюють у перехідній області опору і це відображено у наведених там таблицях при  $V \leq 2,5$  м/с і  $D \leq 2500$  мм, а в [2] навпаки вважається, що при  $V \geq 1,2$  м/с встановлюється квадратична область опору, що неточно. Це відбувається тільки при  $Re \geq Re_{кв}$ .

**Підсумки.** Проведені дослідження характеризують новий підхід до визначення гідравлічних опорів у трубах, а наведені рекомендації є більш достовірними і дозволяють розраховувати трубопроводи різного призначення при русі і різних рідин (а не тільки води) і різних температурах.

#### Список літератури

1. *Альтшуль А.Д.* Гидравлические сопротивления. – М.: «Недра», 1982. – 224 с.
2. *Шевелєв Ф.А.* Исследование основных гидравлических закономерностей турбулентного движения в трубах. – М.: «Госстройиздат», 1953. – 208 с.
3. *Шевелєв Ф.А, Шевелєв А.А.* Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб. Справочное пособие. – М.: ООО «Бастет», 2007. – 350 с.