

УДК 532.5.013.12

doi: 10.32620/aktf.2023.4.03

О. Г. СЕЛЕЗЕНЬ, М. В. ШЛЯХОВ, Р. С. ОРЛОВ

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
"Харківський авіаційний інститут", Харків, Україна

КОЕФІЦІЄНТ ГІДРАВЛІЧНОГО ОПОРУ ТЕРТЯ КАПІЛЯРІВ ЗА МАЛИХ ЧИСЕЛ РЕЙНОЛЬДСА

У системах забезпечення теплового режиму як у космічних, так і в наземних застосуваннях, широко використовуються насосні контури теплопереносу з рідкими або двофазними теплоносіями. Ці системи відіграють важливу роль у підтримці оптимальної температури і розподілі тепла в різних проєсах і пристроях. Для забезпечення ефективного розподілу потоків теплоносія гідравлічною мережею, в таких системах, застосовуються дроселі. Особливо важливо забезпечити надійність роботи системи за малих витрат теплоносія. Тому раціональним підходом є виготовлення дроселів у вигляді відрізків капілярів. Капілярні дроселі мають здатність регулювати потік теплоносія з високою точністю, що дає змогу поліпшити контроль над тепловим режимом системи. Для розрахунку і визначення характеристик таких дроселів важливо знати коефіцієнт гідравлічного опору тертя λ , який використовується у формулі Дарсі. Цей коефіцієнт залежить від різних факторів, включно з геометрією дроселя, фізичними властивостями теплоносія та умовами потоку. Тому **метою роботи** було визначення значення коефіцієнта гідравлічного опору тертя λ . У роботі було виконано експерименти з проливанням мідних капілярів різного внутрішнього діаметра (0,8-1,2 мм) на воді та ізопропіловому спирті. Експерименти проводилися в ламінарній і перехідній областях, у діапазоні чисел Рейнольдса від 250 до 6050. **Висновки.** У ламінарній області ($Re < 1185$) рекомендується користуватися формулою Пуазейля. У перехідній і турбулентній області ($1185 < Re < 6050$), рекомендується користуватися формулою Блазіуса. **Результати** експериментів дали змогу отримати дані про значення коефіцієнта гідравлічного опору тертя λ . Ці дані можуть бути використані для розрахунку дроселів у подібних системах теплопереносу. Ба більше, у роботі надано рекомендації щодо використання відомих формул розрахунку дроселів, що дає змогу інженерам і проєктувальникам ефективно реалізовувати ці елементи у своїх проєктах. Таким чином, дослідження, проведені в цій роботі, мають важливе практичне значення для розроблення й оптимізації систем теплопереносу в космічній і наземній сферах.

Ключові слова: капіляр; мідні капіляри; коефіцієнт гідравлічного опору тертя; формула Дарсі; гідравлічний опір; дросель; система забезпечення теплового режиму; експериментальні дослідження.

Вступ

У системах забезпечення теплового режиму космічного і наземного застосування використовують насосні контури теплопереносу з однофазним або двофазним (киплячим) теплоносієм. Як теплоносієм використовують рідини з істотно різними теплофізичними властивостями: вода, аміак, розчини різних гліколів, спирти, фреони тощо. Контури зазвичай виконуються у вигляді розгалуженої гідравлічної мережі, яка повинна забезпечити надійне відведення тепла від охолоджуваних пристроїв на всіх робочих режимах експлуатації системи. Для забезпечення необхідного розподілу потоків теплоносія по гілках гідравлічної мережі використовуються дроселі. Коли витрата теплоносія мала, то раціонально дроселі виконувати у вигляді трубок малого діаметра (капілярів), підбираючи їхню необхідну довжину. Для

розрахунку гідравлічного опору капілярів необхідно визначати коефіцієнт опору тертя у формулі Дарсі-Вейсбаха λ , який, своєю чергою, залежить від числа Рейнольдса Re і ефективної шорсткості трубок. Однак шорсткість капілярів зазвичай не відома, вона залежить від технології виготовлення трубок різними виробниками. Крім цього, робочий діапазон експлуатації капілярів часто збігається з перехідним режимом $2000 < Re < 4000$, у якому коефіцієнт тертя залежить від багатьох факторів, зокрема випадкових, і погано піддається розрахунку.

Тому надійнішим є пряме експериментальне визначення коефіцієнта опору тертя капілярів. У цій роботі виконано проливання мідних капілярів діаметром 0,8...1,2 мм на воді та ізопропіловому спирті в діапазоні чисел Рейнольдса $250 < Re < 6050$. Визначено коефіцієнт опору і рекомендовано формули для його розрахунку на різних ділянках течії.

1. Постановка задачі

Цілями цієї роботи є:

- експериментальне визначення коефіцієнта гідравлічного опору мідних капілярів;
- порівняння отриманих експериментальних даних з відомими кореляціями;
- надати рекомендації з розрахунку коефіцієнта гідравлічного опору для мідних капілярів у діапазоні чисел Рейнольдса 250 - 6000.

2. Зразки капілярів.

Експериментальний стенд.

Похибки

Досліджувалися зразки мідних капілярів виробництва компанії Feingohren (Італія) з внутрішнім діаметром $d_{in} = 0,8; 1,0; 1,2$ мм, завдовжки 40; 75; 150; 300 мм на установці, наведеній на рис. 1. Досить велика довжина зразків капілярів виключала вплив початкової ділянки течії.

Установка містила бак постійного рівня й опускную трубу великого діаметра. Проливання капілярів на воді та ізопропіловому спирті виконувалося на стаціонарних режимах за різного гідростатичного напору H . Кожний режим повторювали не менше 5 разів.

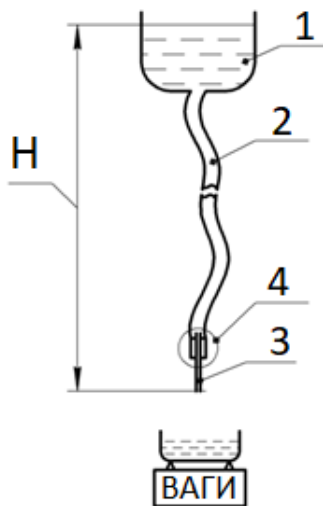


Рис. 1. Експериментальна установка
1 - бак постійного рівня; 2 - опускна труба;
3 - досліджуваний капіляр; 4 - втулка.

Було виконано розрахунок похибки визначення коефіцієнта гідравлічного опору λ з урахуванням похибок геометрії, методики та інструментальних вимірювань. Відносна похибка прогнозувалася не більше 5%.

3. Результати проливання капілярів

Експериментальні результати нанесені (рис. 2, 3) на відомі графіки залежності λ від числа Рейнольдса Re [1].

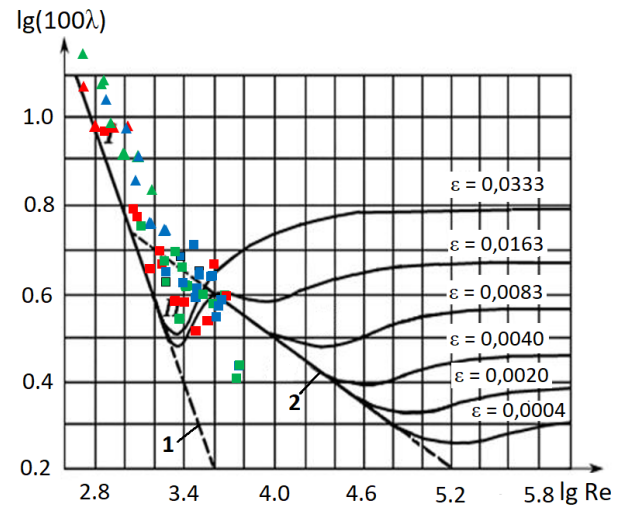


Рис. 2. Залежність коефіцієнта λ від Re для труб із рівномірно-зернистою шорсткістю (графіки Нікурадзе):

1 - формула Пуазейля (1), 2 - формула Блазіуса (2);
 Δ - ізопропіловий спирт; \square - вода

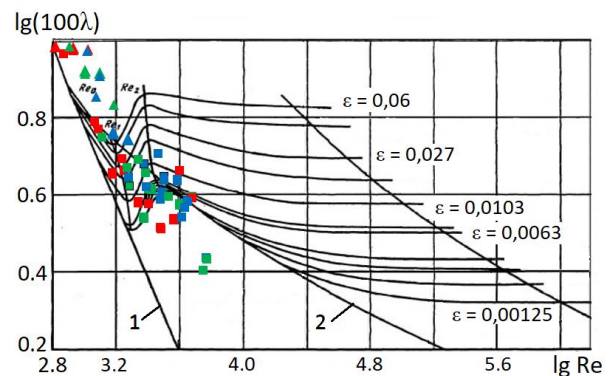


Рис. 3. Залежність коефіцієнта λ від Re для технічних труб із нерівномірною шорсткістю:
1 - формула Пуазейля (1), 2 - формула Блазіуса (2).
 Δ - ізопропіловий спирт; \square - вода

Під час течії рідини в трубах, можуть спостерігатися три режими течії: ламінарний ($Re < 2000$), турбулентний ($Re > 4000$) і перехідний ($2000 < Re < 4000$). За ламінарного режиму, λ залежить тільки від Re . За перехідного і початкового турбулентного режимів λ залежить ще й від відносної шорсткості стінки труби $\varepsilon = \Delta/d_{in}$, де Δ - абсолютна шорсткість. За великих $Re > 10000$ спостерігається квадратичний закон гідравлічного опору, автомодельність за числом Re . λ залежить тільки від відносної шорсткості ε .

На рисунках 2-4 наведені відомі експериментальні та розрахункові залежності різних авторів для рівномірно-зернистої шорсткості (див. рис. 2), нерівномірної шорсткості в технічних трубах (див. рис. 3) і розрахункові залежності (див. рис. 4) з робіт [1, 3], на які нанесені власні експериментальні результати.

4. Рекомендації по використанню формул для розрахунку коефіцієнта гідравлічного опору

Експерименти проведено в діапазоні $250 < Re < 6050$. Більшість експериментальних точок знаходяться в області ламінарних і перехідних режимів. Незважаючи на досить низьку інструментальну й методичну похибку (~5%), розкид експериментальних точок був досить великий. У ламінарній області ~ 10...15%; у перехідній області ~ 15...20%. Великий розкид експериментальних даних може визначитися впливом різних інших параметрів параметричного типу, окрім числа Рейнольдса, дуже малими діаметрами і похибкою визначення їхнього розміру, відмінністю властивостей рідин.

У перехідній ділянці можуть впливати і випадкові чинники на реалізацію змішаного ламінарно-турбулентного режиму.

У капілярах товщина прилеглої шару порівнянна з діаметром трубок, що також позначається на можливості застосування відомих формул для розрахунку гідравлічного опору.

На підставі проведених експериментів рекомендується розраховувати λ :

- в області $Re < 1185$ – за формулою Пуазейля:

$$\lambda = \frac{64}{Re}; \quad (1)$$

- в перехідній області $1185 < Re < 6050$ – за формулою Блазіуса:

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}. \quad (2)$$

При використанні формул за великих чисел Re , які враховують шорсткість, можна приймати для даних капілярів відносну шорсткість $\varepsilon \sim 0...0,002$.

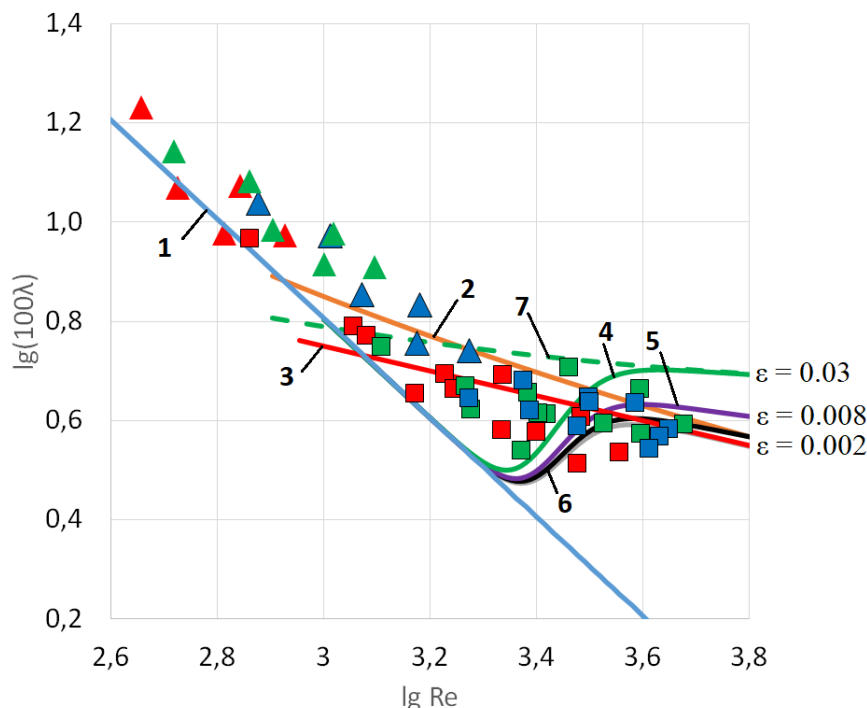


Рис.4. Порівняння експериментальних результатів із розрахунковими залежностями

$\lambda = f(Re)$ різних авторів [1-3]:

1 – формула Пуазейля [1]; 2 – формула Конакова [1]; 3 – формула Блазіуса [1];

4-6 – універсальна формула Чернікіна [2] за різних відносних шорсткостей ε ;

7 – формула Альтшуля за шорсткості $\varepsilon = 0,03$ [3];

Δ – ізопропіловий спирт; \square – вода

У всьому діапазоні чисел Рейнольдса, включно з перехідною областю, можна також використовувати універсальну формулу Чернікіна з роботи [3], задаючи відносну шорсткість капілярів $\varepsilon \sim 2...5\%$.

Ці рекомендації дають змогу розраховувати коефіцієнт гідравлічного опору тертя λ мідних капілярів із внутрішнім діаметром 0,8-1,2 мм із достатньою для інженерної практики точністю.

Висновки

1. Виконано проливання мідних капілярів діаметром 0,8...1,2 мм на воді та ізопропіловому спирті в діапазоні чисел Рейнольдса $250 < Re < 6050$.

2. Визначено коефіцієнт гідравлічного опору λ і рекомендовано формули для його розрахунку на різних ділянках течії.

3. У ламінарній області $Re < 1185$ дані експериментів корелюють із формулою Пуазейля (1), де вони розташовуються з невеликим розкидом.

4. У перехідній і турбулентній області $1185 < Re < 6050$, дані корелюють із формулою Блазіуса (2). Тут точки розташовуються з великим розкидом.

Внесок авторів: розробка експериментального стенду, проведення експериментів та обробка результатів експериментів – **О. Г. Селезень**; аналіз та обробка результатів експериментів – **О. Г. Селезень, М. В. Шляхов, Р. С. Орлов**.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Поступила в редакцію 03.06.2023, розглянута на редколегії 08.08.2023

COEFFICIENT OF HYDRAULIC RESISTANCE OF CAPILLARY FRICTION AT LOW REYNOLDS NUMBERS

*Oleh Selezhen, Mark Shlyakhov,
Roman Orlov*

Heat transfer pump circuits with liquid or two-phase heat transfer fluids are widely used in thermal management systems in both space and ground applications. These systems play an important role in maintaining the optimal temperature and heat distribution in various processes and devices. Such systems use throttles to ensure efficient distribution of coolant flows through the hydraulic network. It is especially important to ensure the reliability of the system at low coolant consumption. Therefore, a rational approach is to manufacture throttles in the form of capillary segments. Capillary throttles can regulate the flow of coolant with high accuracy, which makes it possible to improve control over the thermal regime of the system. To calculate and determine the characteristics of such throttles, it is important to know the coefficient of hydraulic friction resistance λ , which is used in the Darcy formula. This coefficient depends on various factors, including the geometry of the throttle, physical properties of the heat transfer fluid, and flow conditions. Therefore, the **aim** of this study was to determine the value of the hydraulic friction resistance coefficient λ . In this work, experiments were performed with the shedding of copper capillaries of different internal diameters (0.8-1.2 mm) in water and isopropyl alcohol. The experiments were carried out in the laminar and transient regions, in the range of Reynolds numbers from 250 to 6050. **Conclusions.** In the laminar region ($Re < 1185$), it is recommended to use the Poiseuille formula. In the transitional and turbulent regions

Література

1. Идельчик, И. Е. *Справочник по гидравлическим сопротивлениям [Текст] / И. Е. Идельчик. – Москва : «Машиностроение», 1992. – 672 с*

2. Lorbek, L. *Impact of neglecting the variations in the relative surface roughnesses of capillary tubes on the accuracy of a capillary tube model [Text] / L. Lorbek, T. Katranik, A. Kitanovski // International Journal of Refrigeration. – 2021. – Vol. 129. – P. 194-203. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2021.04.022.*

3. Черников, А. В. *Обобщение расчёта коэффициента гидравлического сопротивления трубопроводов [Текст] / А. В. Черников // Наука и технология углеводородов. – 1998. – № 1. – С. 21-23.*

References

1. Idel'chik, I. E. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivlenijam [Reference book on hydraulic co-protivlenijam]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1992. 672 p.*

2. Lorbek, L., Katranik, T. & Kitanovski, A. *Impact of neglecting the variations in the relative surface roughnesses of capillary tubes on the accuracy of a capillary tube model. International Journal of Refrigeration, 2021, vol. 129, pp. 194-203. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2021.04.022.*

3. Chernikin, A. V. *Obobshhenie rascheta koeficienta gidravlichesкого soprotivlenija truboprovodov [Generalization of calculation of hydraulic resistance coefficient of pipelines]. Nauka i tehnologija uglevodorodov – Hydrocarbon science and technology, 1998, no. 1, pp. 21-23.*

($1185 < Re < 6050$), it is recommended to use the Blasius formula. The **results** of the experiments made it possible to obtain data on the value of the hydraulic friction resistance coefficient λ . These data can be used to calculate throttles in similar heat transfer systems. Moreover, the paper provides recommendations on the use of well-known formulas for calculating throttles, which allows engineers and designers to effectively implement these elements in their projects. Thus, the research conducted in this paper has important practical implications for the development and optimization of heat transfer systems in space and terrestrial applications.

Keywords: capillary; copper capillaries; hydraulic friction resistance coefficient; Darcy's formula; hydraulic resistance; throttle; thermal management system; experimental studies.

Селезень Олег Георгійович – студ. каф. теорії авіаційних двигунів, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Шляхов Марк Валентинович – інженер, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Орлов Роман Сергійович – асп. каф. аерокосмічної теплотехніки, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Oleh Selezen – Student of the Dep. of Theory of Aircraft Engines, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine,

e-mail: selezen.oleh@gmail.com, ORCID: 0009-0002-2805-7503.

Mark Shliakhov – Engineer, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine,

e-mail: valmarksh@gmail.com, ORCID: 0009-0005-3680-243X.

Roman Orlov – PhD Student of Dep. of Aerospace Heat Engineering, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine,

e-mail: romaorlov1@gmail.com, ORCID:0000-0001-5826-4648.