

феноменологічного підходу: співвідношення симетрії, принципу взаємності. Дано відомості про хімічний потенціал Гіббса для суміші. Розглянуто питання про виробництво ентропії для нестационарних і нерівноважних систем. Виконано аналіз еволюції ентропії і умови тотожності Гіббса, що стосується її виробництва.

Ключові слова: нерівноважна система, багатокомпонентне середовище, співвідношення Онзагера, хімічний потенціал Гіббса, принцип взаємності Онзагера-Казимира, співвідношення симетрії, еволюція виробництва ентропії

EVOLUTION OF ENTROPY IN MULTICOMPONENT NONEQUILIBRIUM SYSTEMS

B. Draganov,
A. Mishchenko,
E. Shelimanova

Abstract. These foundations analysis method of nonequilibrium multicomponent systems based on the provisions of the Onsager, including phenomenological approach: the ratio of symmetry, reciprocity. The information on the chemical potential of Gibbs for mix is given. The question of entropy production for non-stationary and non-equilibrium systems is consider. The evolution of entropy and Gibbs identity conditions relating to its production are made out.

Keywords: nonequilibrium systems, multicomponent medium, the Onsager's ratio, Gibbs' chemical potential, reciprocity of Onsager-Casimir, the ratio of symmetry, evolution of entropy production

УДК 631.3:621.1

ДОСЛІДЖЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ГІДРАВЛІЧНОГО ТЕРТЯ ПІД ЧАС РУХУ РІДИНИ В НАПІРНОМУ ТРУБОПРОВОДІ

В. Є. ВАСИЛЕНКОВ, кандидат технічних наук
О. В. НАЗЕМЦЕВ, студент магістратури
e-mail: wasil14@ukr.net

Анотація. Розглянуто теорію руху рідини, отримані фізичні фактори, що впливають на коефіцієнт гідравлічного тертя під час руху рідини в напірному трубопроводі, встановлення методів його визначення.

Ключові слова: рух рідини, втрати напору, тиск, напірний трубопровід, коефіцієнт Дарсі (коефіцієнт гідравлічного тертя)

В інженерній практиці під час руху рідини в трубах рішення багатьох задач зводиться до знаходження залежності, що визначає зміну

швидкості й тиску по довжині потоку. Для цього звичайно використовуються два рівняння гідродинаміки [1, 2]:

- рівняння нерозривності потоку

$$Q = \omega V = \text{const} , \quad (1)$$

- рівняння Бернуллі

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + h_v . \quad (2)$$

Ці два рівняння мають три невідомих величини V , P і h_v тому для їх визначення необхідно мати третє рівняння. Таким рівнянням є залежність втрат напору h_v від середньої швидкості V . Кількісне визначення втрат напору являє собою одну з головних задач гідродинаміки і є актуальною задачею.

Мета досліджень – визначення коефіцієнта гідравлічного тертя під час руху рідини в напірному трубопроводі.

Матеріали і методика досліджень. Розглядається рух рідини в напірному трубопроводі. Під час досліджень використовується графік Нікурадзе [3].

Результати досліджень. Розрізняють два види втрат напору:

- втрати за довжиною;
- втрати на місцевих опорах.

Таким чином, загальні втрати напору визначаються як

$$h_v = h_l + h_m, \quad (3)$$

Втрати напору по довжині трубопроводу зумовлюються роботою сил тертя. Під час руху рідини вони розподіляються рівномірно по довжині трубопроводу постійного перерізу й збільшуються пропорційно до довжини труби.

Згідно з рівнянням Д. Бернуллі, втрати напору по довжині визначаються таким чином

$$h_l = \left(Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right) - \left(Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right), \quad (4)$$

Для горизонтальної труби постійного перерізу рівняння (4) при $z = \text{const}$ і $V = \text{const}$ спрощується й приймає вигляд:

$$h_l = \frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_2}{\rho g} , \quad (5)$$

За обґрунтованими висновками Дарсі та Вейсбаха, втрати напору по довжині під час руху рідини в трубах визначаються за формулою:

$$h_l = \lambda \frac{L V^2}{d 2g} , \quad (6)$$

де λ – коефіцієнт Дарсі (коефіцієнт гідравлічного тертя);

L – довжина ділянки труби;

d – діаметр трубопроводу;

V – середня швидкість потоку;

g – прискорення вільного падіння.

Ця формула застосовується для ламінарного й турбулентного режимів руху. Точність розрахунків залежить від правильного вибору формули для визначення коефіцієнта гідравлічного тертя. Таким чином, при визначенні втрат напору коефіцієнт λ набуває досить важливого значення. Тому визначення фізичних факторів, що впливають на його значення, і встановлення методів його визначення було впродовж тривалого часу предметом широких теоретичних та експериментальних досліджень.

Сучасні розрахункові формули для визначення коефіцієнта λ передбачають його залежність у загальному випадку від шорсткості стінок труби та числа Рейнольдса.

Для вивчення факторів, що впливають на значення коефіцієнта λ , і розробки теорії руху рідини в трубопроводах, суттєве значення мали роботи Прандтля, Кармана, Нікурадзе та інші.

Систематичні експерименти Нікурадзе, що проводилися в 1933 р., з дослідження руху води в трубах зі штучною рівномірно зернистою шорсткістю із кварцового піску, були узагальнені як залежність λ від

$$\text{певних параметрів } \lambda = f\left(R_E; \frac{K_E}{d}\right).$$

Аналізуючи графіки Нікурадзе (див. рисунок) можна виділити характерні області (1, 2, 3, 4), у межах кожної з яких залежність коефіцієнта λ від числа Рейнольдса та відносної еквівалентної шорсткості $\left(\frac{K_E}{d}\right)$ має свій особливий характер.

1 – область між прямою MN і початком координат – область ламінарного режиму руху ($Re < 2320$). Коефіцієнт λ у цій області обумовлюється силами в'язкості рідини й не залежить від шорсткості стінок труби, його величина визначається за формулою Пуазейля

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (7)$$

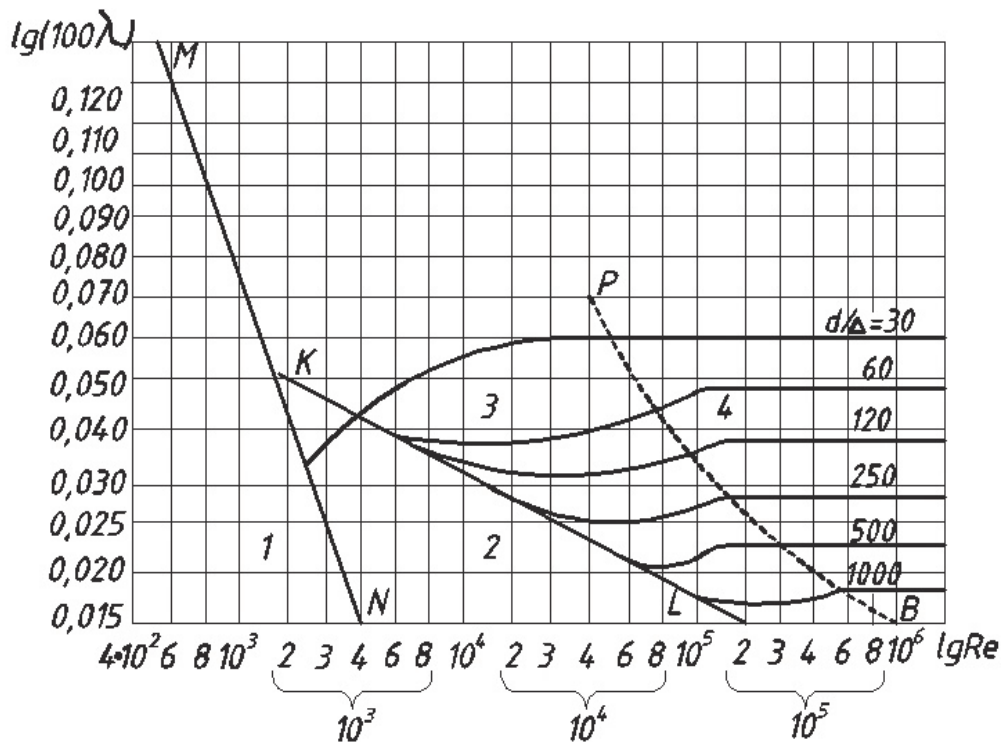
Межею цієї області є число $Re = 2320$.

2 – область між лініями MN і KL – область гідравлічно гладких труб. Потік рідини тут уже знаходиться в умовах турбулентного режиму руху ($Re > 2320$), однак поблизу стінок у в'язкому прошарку зберігається нерухома ламінарна плівка, що покриває виступи шорсткості стінок труби, і потік рухається немовби по гідравлічно гладкому трубопроводу (по рідинному нерухомому шару). Реалізується така течія при числі

Рейнольдса, що знаходиться в межах $4000 < Re < 10 \frac{d}{K_E}$.

Величина λ у цій області визначається за формулою Блазіуса:

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} \quad (8)$$



Графік Нікурадзе

3 – область між лініями KL і AB – перехідна область. У цій області в міру збільшення швидкості, товщина ламінарної плівки на стінці труби зменшується, частково відкриваючи виступи шорсткості. На цих відкритих виступах спостерігаються зриви потоку й утворюються вихрові ядра. У такому потоці втрати напору обумовлюються як шорсткістю стінок труби, так і силами в'язкості рідини, тобто числом Рейнольдса.

Межі цієї області визначаються нерівністю $10 \frac{d}{k_E} < Re < 500 \frac{d}{k_E}$.

Для перехідної області найбільшого поширення у вітчизняній практиці по визначенню коефіцієнта λ одержана універсальна формула А. Д. Альтшуля

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{k_E}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}, \quad (9)$$

де k_E – висота еквівалентної шорсткості; d – діаметр трубопроводу.

4 – область праворуч від лінії AB – область квадратичного опору. Швидкість потоку рідини досягає значення, при якому втрати напору не залежать від числа Рейнольдса, а зумовлюються лише силами тертя потоку об стінки трубопроводу. Визначальним параметром тут є відносна еквівалентна шорсткість. Пристінна ламінарна плівка повністю руйнується, в'язкісний прошарок зникає, і потоком омиваються всі виступи шорсткості по всій їх висоті. На них утворюється поле дрібномасштабних вихорів, яке поширюється по всьому потоку.

Нижньою межею цієї області є $Re > 500 \frac{d}{k_E}$. Універсальна формула (9) для цієї області перетворюється у формулу Шифрінсона

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{k_E}{d} \right)^{0,25} \quad (10)$$

При розрахунках втрат напору в пневмосистемах звичайно використовують питомий опір, значення якого беруть із довідкової літератури, наприклад, таблиць Шевельова, де наводяться його значення для квадратичної області опору. Формула для визначення питомого опору

$$A = \frac{L\lambda}{\pi^2 g d^5} \quad (11)$$

У формулу (11) входить коефіцієнт λ , який у деяких випадках залежить не тільки від відносної еквівалентної шорсткості, але й від числа Рейнольдса (а отже, й від швидкості v). Отже, питомий опір не може бути постійною величиною для кожного режиму. Він постійний тільки в автомодельній по Re зоні, тобто у квадратичній області опору. Для сталених та чавунних труб при русі води ця область настає при швидкостях $V > 1,2$ м/с. При швидкості $v < 1,2$ м/с табличне значення A слід помножити на поправковий коефіцієнт δ , значення якого вибирається, залежно від швидкості руху v , із таблиці.

Значення поправочного коефіцієнта

v , м/с	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	0,9	1,0	1,1	1,62
δ	1,41	1,28	1,20	1,15	1,115	1,085	1,06	1,045	1,02	1,00

Висновки

Отримані параметри, від яких залежить коефіцієнт λ в різних областях руху рідини, визначення коефіцієнта λ , еквівалентної шорсткості k_E в лабораторних умовах.

Список літератури

1. Запольський А. К. Водопостачання, водовідведення та якість води /А. К. Запольський. – К. : Вища школа, 2005. – 671 с.
2. Найманов А. Я. Водоснабжение / Найманов А. Я., Никиша С. Б. – Донецьк : Норд-прес, 2004. – 649 с.
3. Кравченко В. С. Водопостачання та каналізація / В. С. Кравченко. – К. : Кондор, 2009. – 288 с.
4. Тугай А. М. Водопостачання та водовідведення : підруч. / Тугай А. М., Орлов В. О., Орлова А. М. – К. : Знання, 2011. – 359 с.

References

1. Zapolskyi, A. K. (2005). Vodopostachannya, vodovidvedennya ta yakist vody. [Water supply, sanitation and water quality]. Kyiv: Vyshcha shkola, 671.

2. Naymanov, A. Y., Nikisha, S. B. (2004). Vodosnabzheniye [Water supply]. Donetsk: Nord-pres, 649.

3. Kravchenko, V. S. (2009). Vodopostachannya ta kanalizatsiya [Water supply and sewerage]. Kyiv.: Kondor, 288.

4. Tuhai, A. M., Orlov, V. O., Orlova, A. M. (2011). Vodopostachannya ta vodovidvedennya: pidruchnyk [Water and wastewater]. Kyiv: Znannya, 359.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ТРЕНИЯ ПРИ ДВИЖЕНИИ ЖИДКОСТИ В НАПОРНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ

**В. Е. Василенков,
О. В. Наземцев**

Аннотация. Рассмотрена теория движения жидкости, полученные физические факторы, влияющие на коэффициент гидравлического трения при движении жидкости в напорном трубопроводе, установление методов его определения.

Ключевые слова: движение жидкости, потери напора, давления, напорный трубопровод, коэффициент Дарси (коэффициент гидравлического трения)

INVESTIGATION OF FRICTION FACTOR IN THE HYDRAULIC FLUID FLOW IN THE PRESSURE PIPE

**V. Vasilenkov,
A. Nazemtsev**

Abstract. We consider the motion of a fluid theory received physical factors affecting the coefficient of hydraulic friction fluid flow in the discharge line, the establishment of methods for its determination.

Keywords: fluid motion, loss of pressure, pressure, pressure line, Darcy coefficient (coefficient of hydraulic friction)