

13. Baskharone, E. A., Principles of Turbomachinery in Air-Breathing Engines [Текст] / E. A. Baskharone. New York, United States of America.: Cambridge university press, 2006. – 600 p.

Проведено аналіз наявних літературних даних про неусталені рухи рідини. Показано, що розподіл швидкостей при неусталеному русі не відповідає розподілу швидкостей властивому усталеному руху. Нерівномірність розподілу швидкостей в живому перерізі не враховується при визначенні інерційного напору в методиках, що використовуються. На основі експериментальних і теоретичних досліджень запропонована вдосконалена методика для визначення втрат напору при нестационарному русі нестисливої рідини в трубопроводах

Ключові слова: неусталений, нестационарний, рух рідини, розподіл швидкостей, структура потоку, втрати напору, інерційний напір

Выполнен анализ имеющихся литературных данных о неустановившемся движении жидкости. Показано, что распределение скоростей при неустановившемся движении не соответствует распределению скоростей присущему установившемуся движению. Неравномерность распределения скоростей по живому сечению не учитывается при определении инерционного напора в используемых методиках расчета. На основании экспериментальных и теоретических исследований предложена усовершенствованная методика для определения потери напора при нестационарном движении несжимаемой жидкости в трубопроводах

Ключевые слова: неустановившейся, нестационарный, движение жидкости, распределение скоростей, структура потока, потери напора, инерционный напор

УДК 532.54.013.2

ВТРАТИ НАПОРУ ПРИ НЕУСТАЛЕНОМУ РУСІ НЕСТИСЛИВОЇ РІДИНИ В ТРУБОПРОВОДАХ

О. М. Яхно

Доктор технічних наук, професор
Кафедра прикладної
гідроаеромеханіки і механотроніки
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут”
пр. Перемоги, 37, м. Київ, 03056

Р. М. Гнатів

Кандидат технічних наук, доцент
Кафедра гідравліки і сантехніки
Національний університет
“Львівська політехніка”
вул. Дуброва, 4, Львівська обл.,
м. Стрий, 82400

E-mail: roman.gnativ@mail.ru

1. Вступ

В даний час у сучасній техніці виник цілий ряд задач, для вирішення яких необхідно точно визначити величину гідравлічних втрат при неусталеному русі рідини. До числа таких завдань відноситься цілий ряд питань автоматичного регулювання в системах з гідравлічними ланками.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

В загальній постановці для будь-якого закону зміни тиску за часом задача була досліджена в роботі Громека [1] ще в 1882 році. Пізніше різні випадки цієї задачі були розглянуті в працях Слезкіна [2], Дейвіса, Вебера [3], Панчурина, Райзмана [4].

Питання про втрати напору на тертя рідини в трубопроводах розглянуті в роботах Панчурина [5], Мелконяна [6].

В роботі Попова [7] виведено рівняння для визначення дотичного опору на стінці труби в залежності від зміни середньої швидкості руху рідини в трубі.

В інших роботах Попова [8, 9] методом передаточних функцій досліджується вплив нестационарності потоку на гідравлічний опір труби.

В роботі Білоцерковського [10] для дослідження неусталеної течії використовується метод малого параметру, причому в якості нульового наближення використовується усталений рух.

3. Мета дослідження

Удосконалення методики розрахунку структур неусталених потоків рідини в круглих трубопроводах.

4. Результати досліджень

При розв'язку задач руху в'язкої нестисливої рідини в трубопроводі виходять зазвичай з рівняння Бернуллі [11]. В умовах плавного змінного неусталеного руху рівняння Бернуллі можна записати у вигляді (рис. 1):

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + h_1 + h_2, \quad (1)$$

де z_1 і z_2 — геометрична висота точок відповідних живих перерізів,

$$\frac{P_1}{\gamma} \text{ і } \frac{P_2}{\gamma} - \text{п'єзометричні висоти для цих точок,}$$

α_1 і α_2 — корективи кінетичної енергії в перерізах 1-1 і 2-2,

V_1 і V_2 — середні швидкості в перерізах 1-1 і 2-2,

h_1 — втрати напору від перерізів 1-1 до 2-2,

h_i — інерційний напір.

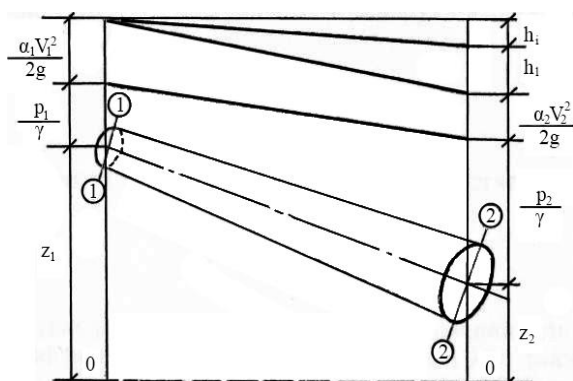


Рис. 1. Геометрична інтерпретація втрат напору при неусталеному русі рідини

В окремому випадку горизонтального циліндричного напірного трубопроводу різниця п'єзометричних висот дорівнює сумі

$$\frac{\Delta p}{\gamma} = h_1 + h_i,$$

а рух рівномірний вздовж трубопроводу і $a_1 = a_2$.

У формулі (1) всі складові, крім двох останніх у правій частині, зберігають при неусталеному русі той же зміст, що й при усталеному русі і не вимагають додаткового пояснення. Тому детальніше розглянути лише складові h_1 і h_i .

Складова h_1 показує ту частину енергії, яка дисипується між розглянутими перерізами завдяки роботі сил тертя.

У випадку турбулентного усталеного руху в циліндричному трубопроводі h_1 обчислюють за відомою формулою Дарсі:

$$h_1 = \lambda \frac{l}{d} \frac{V^2}{2g}, \tag{2}$$

де λ — коефіцієнт гідравлічного тертя, l — довжина розглянутої ділянки трубопроводу, d — діаметр напірного трубопроводу, V — середня швидкість в живому перерізі.

Завдяки відсутності достовірних даних про величину коефіцієнта гідравлічного тертя λ при неусталеному русі, в останньому випадку при обчисленні втрат напору зазвичай приймають

$$\lambda_{\text{неуст}} = \lambda_{\text{уст}}.$$

Таке трактування питання, як показують досліди на діючих трубопроводах, є наближеною. Вимірювані втрати напору не співпадають з розрахунками, що обчислені відповідно за формулою (1).

Згідно дослідом Нікурадзе і Кольбука-Уайта залежність

$$\lambda = f(\text{Re}_d, \bar{\Delta})$$

для квадратичної області опору представляють у вигляді:

$$\lambda = f(\bar{\Delta}), \tag{3}$$

де $\bar{\Delta} = \frac{\Delta}{d}$ — відносна шорсткість.

Отже, при усталеному русі для даної області коефіцієнт гідравлічного тертя λ , а також втрати напору h_1 залежать тільки від відносної шорсткості.

При неусталеному русі на величину втрат напору впливають крім вищевказаних чинників ще додаткові явища, які виникають за рахунок неусталеного режиму в трубопроводі.

Неусталений рух виникає за рахунок зміни в часі відносного відкриття регулюючого органу, яке певним чином обумовлює закон зміни пришвидшень рідини. При неусталеному русі закон зміни локального пришвидшення обумовлює в свою чергу певний закон деформації епюр осереднених швидкостей. Деформація епюр цих швидкостей викликає зміни градієнтів швидкості, що в свою чергу обумовлює зміну напруження тертя на стінці τ_0 під час неусталеного руху. Від величини τ_0 залежать шукані величини втрат напору h_1 і коефіцієнт гідравлічного тертя $\lambda_{\text{неуст}}$.

Отже, в розглянутому випадку величина локального пришвидшення $\frac{\partial V}{\partial t}$ повинна певним чином впливати на величину $\lambda_{\text{неуст}}$.

Для визначення зазначеної залежності нами був проведений аналіз розмірностей, в результаті якого в першому наближенні вираз для визначення коефіцієнта гідравлічного тертя $\lambda_{\text{неуст}}$ пропонується у вигляді:

$$\lambda_{\text{неуст}} = f\left(\text{Re}, \bar{\Delta}, \frac{d}{V^2} \frac{dV}{dt}\right), \tag{4}$$

де $\frac{d}{V^2} \frac{dV}{dt}$ — безрозмірна змінна.

Для квадратичної області турбулентного руху вираз (4) перетворюється як:

$$\lambda_{\text{неуст}} = f\left(\bar{\Delta}, \frac{d}{V^2} \frac{dV}{dt}\right). \tag{5}$$

Останній відрізняється від (3) новою складовою $\frac{d}{V^2} \frac{dV}{dt}$.

Замість виразу (5) можна представити суму, що складається з $\lambda_{\text{уст}}$ і складової $\Delta\lambda$, що враховує вплив неусталеного руху, тобто

$$\lambda_{\text{неуст}} = \lambda_{\text{уст}} + \Delta\lambda. \tag{6}$$

У випадку, якщо весь процес неусталеного руху відбувається в квадратичній області опору, то $\lambda_{уст}$ не залежить від Re і залежить від Δ трубопроводу. При цьому замість (6) можна записати:

$$\lambda_{неуст} = C + \Delta\lambda, \quad (7)$$

де C — постійна для даного трубопроводу.

Остання складова правої сторони рівняння (1) h_1 враховує ту частину напору, яка витрачається на подолання локальних сил інерції маси рідини, що знаходяться між перерізами 1-1 і 2-2.

Виражаючи h_1 через середню швидкість V потоку і приймаючи, що $\omega = const$ по довжині трубопроводу, отримуємо звичайну формулу:

$$h_1 = \frac{\alpha_0}{g} \int_{s_1}^{s_2} \frac{dV}{dt} ds. \quad (8)$$

У формулі (8) α_0 — коректив кількості руху, $\frac{dV}{dt}$ —

пришвидження потоку, ds — елемент довжини трубопроводу.

Коректив кількості руху α_0 входить в формулу (8) і враховує нерівномірність розподілу швидкостей в живому перерізі на величину інерційного напору.

Як показують попередні досліди, розподіл швидкостей при неусталеному русі не відповідає розподілу швидкостей, властивому усталеному руху [12].

Згідно з літературними даними зміна розподілу швидкостей в напірних трубопроводах в процесі неусталеного руху досі експериментально достатньо не вивчена. При теоретичних дослідженнях розподілу швидкостей зазвичай виходять з рівняння Нав'є-Стокса:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right). \quad (9)$$

Рідина приймається в цьому випадку нестисливою ($\rho = const$) і весь процес ізотермічним. Розв'язок рівняння (9) залежно від прийнятих початкових і граничних умов дає, згідно з літературними даними [2, 4, 10], вельми суперечливі результати. Такий стан можна пояснити тим, що процес неусталеного руху поки недостатньо вивчений. Тому загально прийнятих математичних розв'язків, що відповідають дійсному процесу неусталеного руху, в даний час немає.

Отже, для точного обчислення величини інерційного напору за формулою (8) слід уточнити величину корективу кількості руху α_0 .

Для визначення α_0 в процесі неусталеного руху необхідно безпосередньо на діючій установці виміряти епюри розподілу швидкостей неусталеного руху. Детально експериментальна установка і методика проведення досліджень описана в роботах [13, 14].

Маючи епюри швидкостей, можна обчислювати α_0 для даного моменту часу

$$\alpha_0 = \frac{\int_{\omega} u^2 d\omega}{V^2 \omega}, \quad (10)$$

де V — середня швидкість в живому перерізі, ω — живий переріз трубопроводу, u — швидкість в будь-якій

точці живого перерізу, $d\omega$ — відповідна елементарна площа.

Обчислюються корективи кількості руху α_0 , що відповідають певним моментам часу. Результати опрацювання функції $\alpha_0 = f(t)$ для кожного досліду в залежності від прийнятої змінної подані на рис. 2.

Як видно з графіка, коректив кількості руху α_0 на початку процесу змінюється досить різко і досягає величини 1,18-1,19. Можна припустити, що після проходження максимуму функція асимптотично наближається до одиниці. Область, де проводиться основна частина процесу закриття і представляє зацікавленість при вирішенні практичних задач, зображена суцільною лінією.

Можна відзначити, що недоврахування зміни корективу кількості руху α_0 при обчисленні інерційного напору за формулою (8) може привести до значних помилок (до $\pm 20\%$).

Для повного розв'язку рівняння (1) необхідно експериментальним шляхом знайти функцію, описану виразом (4). При обчисленні величини інерційного напору необхідно враховувати дійсну величину α_0 , визначену дослідним шляхом за формулою (10).

Знайдені таким чином величини інерційного напору h_1 дозволяють знайти положення п'єзометричної (P-P) і напірної лінії (E-E), а також лінію інерційного тиску (i-i) для всього циліндричного трубопроводу.

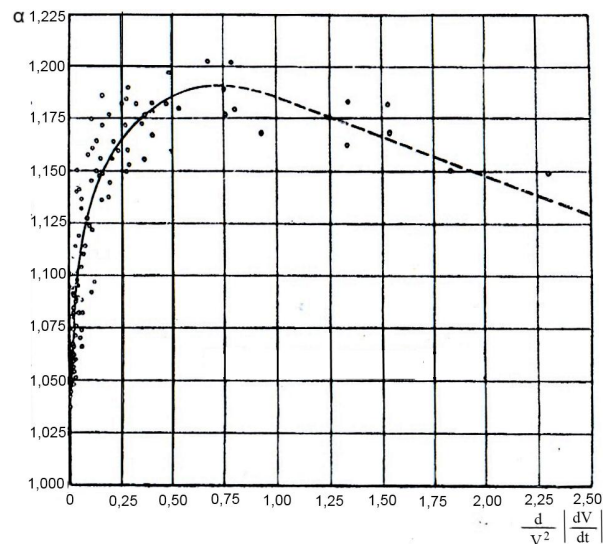


Рис. 2. Залежність зміни корективу кількості руху α_0 від

$$\text{змінної } \frac{d}{\Delta} \left| \frac{dV}{dt} \right|$$

5. Висновки

Запропоновано удосконалену методику для визначення втрат напору при неусталеному русі нестисливої рідини в круглих трубопроводах. На сучасному рівні розвитку практичної гідродинаміки потрібну інформацію про структуру потоку можна отримати шляхом візуалізації потоку в поєднанні із вимірюванням полів швидкостей і характеристик турбулентності [13, 14].

Література

1. Громека, И. С. К теории движения жидкости в узких цилиндрических трубах [Текст]: соб. соч. / И. С. Громека // Уч. зап. Казанского ун-та, 1882, Изд. АН СССР.- 1952.- С.149-171.
2. Слезкин, Н. А. Свойства потоков жидкости, пульсирующей по трубам [Текст] / Н. А. Слезкин // Хим. и нефть. машиностр.- 1969.- №9.- С. 14-17.
3. Дейвис Исследование влияния зависящей от давления вязкости на характеристики течения жидкости в круглой трубе [Текст] / Дейвис, Вебер// Ракетн. техн. и космонавт.- 1973.- 11, №7. – С. 13-19.
4. Панчурин, Н. А. Нестационарное периодическое течение жидкости в круглых трубах [Текст] / Н. А. Панчурин, Д. Х. Ройзман // Труды Ленингр. ин-та водн. трансп.- 1975, вып. 151. – С. 8-16.
5. Панчурин, Н. А. Потери на трение при нестационарном ламинарном течении в трубах [Текст] / Н. А. Панчурин // Труды Ленингр. ин-та водн. трансп.. - 1964. - вып. 77. – С. 38-43.
6. Мелкоян, Г. И. О потерях напора на трение в нестационарном движении жидкости в трубопроводе [Текст] / Г. И. Мелкоян // Труды Ленингр. ин-та водн. трансп.. - 1969. - вып. 122. – С. 68-73.
7. Попов, Д. Н. Обобщенное уравнение для определения касательного напряжения на стенке трубы при неустановившемся движении вязкой жидкости [Текст] / Д. Н. Попов // Изв. высш. учебн. заведений. - Машиностроение, 1967.- №5. – С. 52-57
8. Попов, Д. Н. О потерях в трубопроводе при неустановившемся движении жидкости [Текст] /Д. Н. Попов // Вестн. машиностр.- 1969.- №6. – С. 19-20.
9. Попов, Д. Н. Исследование неустановившегося движения жидкости при переходных процессах в короткой трубе [Текст] / Д. Н. Попов, В. Г. Кравченко // Вестн. машиностр.- 1974.- №6. - С. 7-10.
10. Белоцерковский, П. М. Ламинарное почти установившееся течение несжимаемой жидкости в длинном цилиндрическом канале [Текст] / П. М. Белоцерковский // Научн. тр. ин-та автоматики. М-во приборостр., средств автоматиз. и систем упр. СССР.- 1975.- вып. 7. – С. 69-74.
11. Чугаев, Р. Р. Гидравлика: Учебник для вузов [Текст] /Р. Р. Чугаев.- Л.: Энергоиздат. Ленингр. отделение, 1982.- 672 с.
12. Гнатів, Р. М. Експериментальні дослідження неусталених течій в трубах [Текст] / Р. М. Гнатів, І. П. Вітрух // Промислова гідраліка і пневматика.-2009. - №4 (26). - С.28-31.
13. Гнатів, Р. М. Фізичні дослідження неусталених потоків лазерних доплерівським вимірювачем швидкості [Текст] / Р. М. Гнатів, В. Ю. Петриниць, В. В. Чернюк // Вісник НУВГП.-Вип.3 (47).-Част.5.-2009.-С.264-268.
14. Чернюк, В. В. Візуалізація структури потоків в круглих трубах [Текст] / В.В. Чернюк// Кіно-та фотореєстрація. Промислова гідраліка і пневматика. - 2004. - №4(6). - С.9-12.