

Міністерство освіти і науки України
Національний університет водного господарства і
природокористування
Навчально-науковий інститут
енергетики, автоматики та водного господарства
Кафедра гідротехнічного будівництва та гідравліки

02/03-06M

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторних робіт
із навчальної дисципліни

«ГІДРАВЛІКА»,

розділ «НАПІРНІ СИСТЕМИ»

для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня
за освітньою програмою «Гідроенергетика» спеціальності 145
«Відновлювані джерела енергії та гідроенергетика»
денної та заочної форм навчання

Рекомендовано науково-методичною
радою з якості ННІЕАВГ
Протокол № 2 від 13 жовтня 2025 р.

Рівне – 2025

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт із навчальної дисципліни «Гідравліка», розділ «Напірні системи» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за освітньою програмою «Гідроенергетика» спеціальності 145 «Відновлювані джерела енергії та гідроенергетика» денної та заочної форм навчання. [Електронне видання] / Токар Л. О. Рівне : НУВГП, 2025. 28 с.

Укладач: Токар Л. О., кандидат технічних наук, доцент кафедри гідротехнічного будівництва та гідравліки.

Відповідальна за випуск – Волк Л. Р., в.о.завідувача кафедри гідротехнічного будівництва та гідравліки.

Попередня версія методичних вказівок 01-04-102.

Керівник групи забезпечення освітньої програми «Гідроенергетика» спеціальності 145 «Відновлювані джерела енергії та гідроенергетика» – Галич О. О.

© Л. О. Токар, 2025

© НУВГП, 2025

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	4
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2. Побудова п'єзометричної і напірної лінії при напірному русі рідини в трубопроводі змінного поперечного перерізу	5
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4. Дослідження режимів руху рідини в круглій напірній трубі	11
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5. Визначення коефіцієнта гідравлічного тертя при русі рідини в напірній трубі	16
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6. Визначення втрат напору та коефіцієнта опору при раптовому розширенні потоку в напірному трубопроводі	22
ЛІТЕРАТУРА	52

ПЕРЕДМОВА

Методом сучасної технічної механіки рідини і газу, як і інших фізико – технічних наук, є поєднання теорії з експериментом. Тому вивчення гідравліки вимагає не тільки засвоєння теоретичних основ дисципліни але й оволодіння методикою гідравлічних експериментів.

Багато явищ, які розглядаються на лекціях, або вивчені самостійно, стають цілком зрозумілими лише після безпосереднього спостереження їх у лабораторіях.

Основним призначенням методичних вказівок є ознайомлення студентів з методикою експериментальних досліджень різних гідравлічних явищ, а також засвоєння і закріплення теоретичного матеріалу з найважливіших розділів і окремих питань дисципліни «Технічна механіка рідини і газу».

Методичні вказівки складені відповідно до робочої програми дисципліни і враховано обладнання лабораторії гідравліки НУВГП. Опис кожної лабораторної роботи виконано за такою схемою: загальні відомості; склад лабораторної роботи; дослідна установка; виконання роботи і обробка дослідів; контрольні запитання. Всі лабораторні роботи виконуються в приміщенні лабораторії кафедри гідравліки під час занять за розкладом.

Методика і порядок виконання лабораторних робіт описані у методичних вказівках із розрахунком на виконання студентами повного обсягу роботи самостійно. Забезпеченню самостійності при виконанні роботи і засвоєнню матеріалу сприяє умова, при якій склад групи, яка виконує роботу на дослідній установці, не перевищує 5 студентів.

Передбачається, що техніком-лаборантом лабораторії проводиться монтаж і підготовка установок до роботи, оснащення вивіреною вимірювальною апаратурою, включення електродвигунів та насосів і контроль за їх роботою під час дослідів.

В тих лабораторних роботах, де шукані величини можуть бути обчислені теоретично і визначені експериментально, необхідно одержаний результат порівняти з обчисленим за формулами і зробити висновки про якість лабораторної роботи. Для захисту лабораторної роботи студент повинен усно або письмово відповісти на декілька запитань, перелік яких приведений у кінці кожної роботи як контрольні запитання.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

ПОБУДОВА П'ЄЗОМЕТРИЧНОЇ І НАПІРНОЇ ЛІНІЙ ПРИ НАПІРНОМУ РУСІ РІДИНИ В ТРУБОПРОВОДІ ЗМІННОГО ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕРІЗУ

2.1. Загальні відомості

П'єзометрична і напірна лінії – це графіки зміни по довжині потоку відповідно п'єзометричного і гідродинамічного напорів, які входять в рівняння Д.Бернуллі.

Рівняння Д.Бернуллі для потоку в'язкої рідини при сталому плавномітному русі має наступний вигляд:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha V_2^2}{2g} + h_w . \quad (2.1)$$

Всі члени рівняння мають лінійну розмірність:

z - висота положення вибраної точки в живому перерізі потоку над площиною порівняння, м;

$$\frac{p}{\rho g} - \text{п'єзометрична висота} \left[\frac{H \cdot m^3 \cdot c^2}{m^2 \cdot kg \cdot m} \right] = [m] ;$$

$$\frac{\alpha V^2}{2g} - \text{швидкісна висота (швидкісний напір),} \left[\frac{m^2 \cdot c^2}{c^2 \cdot m} \right] = [m] ;$$

α – коефіцієнт кінетичної енергії (коефіцієнт Коріоліса), який враховує нерівномірність розподілу місцевих швидкостей u по живому перерізу потоку, безрозмірний ($\alpha = 1,05 \div 1,1$), але в деяких випадках (наприклад, при розрахунках труб і каналів) для спрощення, з допустимою для практики похибкою, приймають $\alpha=1$;
 h_w – втрата напору на подолання сил тертя, [м].

Геометричний зміст рівняння Д.Бернуллі легко з'ясувати при вивченні руху рідини в трубі, зображеного на рис. 2.

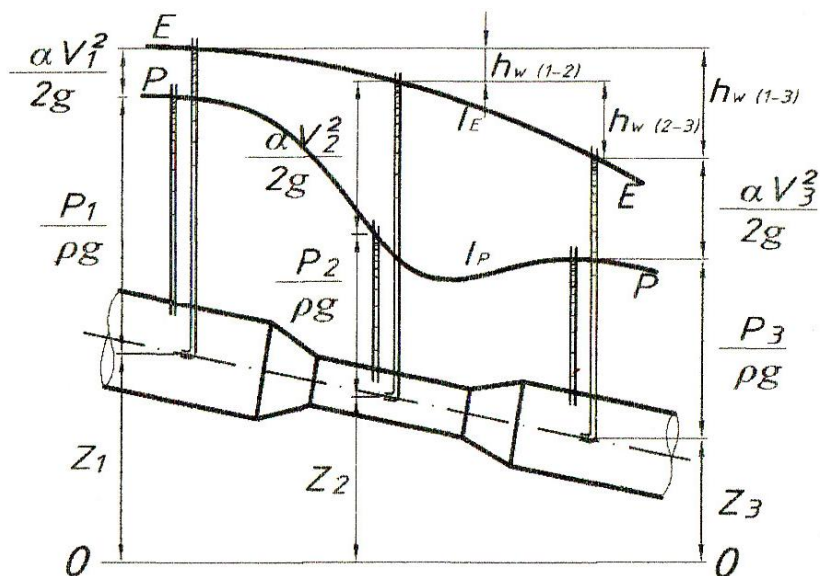


Рис. 2. Схема п'єзометричної та напірної ліній при напірному русі рідини в трубі змінного поперечного перерізу

На вказаній трубі позначено три перерізи, центри ваги яких розміщені від горизонтальної площини порівняння 0-0 на відстані, відповідно, z_1 , z_2 і z_3 . Відкладемо вертикально вгору від центра ваги кожного перерізу п'єзометричну висоту $p/\rho g$ і швидкісну висоту $\alpha V^2/2g$. Крива E-E, яка з'єднує верхні кінці сум трьох вказаних відрізків, називається напірною лінією, а сума трьох висот

$$z + \frac{p}{\rho g} + \frac{\alpha V^2}{2g} = H_0 \quad (2.2)$$

називається гідродинамічним напором.

Для нев'язкої рідини $H_0 = \text{const}$ і тому напірна лінія буде паралельна горизонтальній площині порівняння 0-0, тобто вона буде горизонтальною.

Якщо в трубі рухається в'язка рідина, то гідродинамічний напір вздовж потоку буде зменшуватись тому, що частина напору

втрачається на подолання сил тертя. Таким чином крива $E-E$ виражена низхідною лінією. Падіння напірної лінії на одиницю довжини потоку називається середнім гідравлічним похилом I_E і виражається залежністю:

$$I_E = \frac{h_W}{l}, \quad (2.3)$$

де l - відстань між перерізами;

$$h_W = \left(z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha V_1^2}{2g} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha V_2^2}{2g} \right). \quad (2.4)$$

Лінія Р-Р, що з'єднує верхні кінці сум двох відрізків $(z + p/\rho g)$ називається п'єзометричною лінією, а суму двох висот

$$z + \frac{p}{\rho g} = H \quad (2.5)$$

називається п'єзометричним напором.

Падіння п'єзометричної лінії на одиницю довжини потоку називається п'єзометричним похилом I_P і виражається залежністю:

$$I_P = \frac{\left(z_1 + \frac{p_1}{\rho g} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\rho g} \right)}{l}. \quad (2.6)$$

П'єзометрична лінія може знижуватись при збільшенні швидкості вздовж потоку, або підвищуватися при зменшенні швидкості, а тому п'єзометричний похил може бути або додатнім, або від'ємним. Гідравлічний похил завжди додатній, так як частина гідродинамічного напору h_W витрачається на подолання сил тертя на шляху руху рідини між перерізами.

У випадку рівномірного руху, тобто коли середня швидкість у всіх перерізах однакова, напірна і п'єзометрична лінії між собою взаємно паралельні прямі лінії, а тому, в цьому випадку, гідравлічний і п'єзометричний похили будуть однаковими ($I_E = I_P$).

Кожний із членів рівняння Д.Бернуллі має цілком визначений фізичний (енергетичний) зміст, а саме:

z - питома потенціальна енергія положення рідини в даній точці (енергія рідини, що віднесена до одиниці ваги, називається питомою енергією);

$p/\rho g$ – питома потенціальна енергія гідродинамічного тиску;

$\alpha V^2/2g$ - питома кінетична енергія;

h_W - втрати повної питомої енергії на подолання опору руху рідини.

Сума двох членів ($z + p/\rho g$) – це потенціальна питома енергія рідини в даному перерізі потоку.

Сума трьох членів рівняння Д.Бернуллі – це повна питома енергія рідини в даному перерізі потоку:

$$E = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{\alpha V^2}{2g} . \quad (2.7)$$

Тоді рівняння (2.1) може бути записано для двох перерізів у наступному вигляді:

$$h_W = E_1 - E_2 . \quad (2.8)$$

З фізичної (енергетичної) точки зору лінію $E-E$ називають лінією повної питомої енергії, а лінію $P-P$ – лінією питомої потенціальної енергії.

Таким чином, рівняння Д.Бернуллі, з точки зору фізики, виражає математичний вираз відомого закону збереження механічної енергії руху рідини.

Рівняння Д.Бернуллі знайшло широке застосування при дослідженні різних теоретичних питань технічної механіки рідини (гідравліки) та вирішення практичних задач руху рідини. Так, наприклад, за допомогою рівняння Д.Бернуллі визначається висота установки осі відцентрового насоса і проводиться розрахунок всмоктувальних трубопроводів.

На використанні рівняння Д.Бернуллі засновані розрахунки багатьох водомірних пристроїв (витратомірів Вентурі, діафрагми, сопла) та деяке водопідйомне устаткування (наприклад, ежектори).

Рівняння Д.Бернуллі використовується при розрахунках водопроводів, маслопроводів, бензопроводів, систем водяного охолодження та опалення, при побудові п'єзометричних ліній в напірних трубопроводах і т.п.

2.2. Склад лабораторної роботи

Побудова п'єзометричної і напірної ліній при напірному русі рідини в трубопроводі змінного поперечного перерізу.

2.3. Дослідна установка

Дослідна установка складається з трубопроводу змінного перерізу (рис.2), який об'єднує декілька окремих послідовно з'єднаних між собою труб різних діаметрів. В трьох перерізах з плавно змінним рухом установлені гідрометричні трубки Піто. Гідрометрична трубка складається з прямої трубки, яка є звичайним п'єзометром, і динамічної трубки, нижній кінець якої зігнутий так, щоб її вхідний отвір був направлений проти течії рідини.

Трубопровід з гідрометричними трубками підключений до напірного резервуару з водою, обладнаний краном для регулювання витрати води, а також мірним резервуаром для вимірювання витрати води об'ємним способом.

2.4. Виконання роботи і обробка дослідів

1. За допомогою крану установлюємо таку постійну витрату води, при якій рівні води в гідрометричних трубках займуть зручне положення для відліку.

2. Вимірюємо час T наповнення мірного резервуару об'ємом W і обчислюємо витрату води за формулою

$$Q = \frac{W}{T}, \quad (2.9)$$

а також обчислюємо середні швидкості в кожному перерізі за формулою

$$V = \frac{Q}{\omega}, \quad (2.10)$$

де ω - площа живого перерізу труби.

3. Знімаємо покази п'єзометричного напору $(z + p/\rho g)$ за звичайним п'єзометром, а також повний напір $\left(z + \frac{p}{\rho g} + \frac{\alpha V^2}{2g}\right)$ за показами динамічних трубок.

Швидкісний напір визначаємо як різниця між повним і п'єзометричним напорами.

Якщо трубопровід обладнаний тільки звичайними п'єзометрами (відсутні динамічні трубки), то швидкісний напір обчислюємо за середньою швидкістю за формулою

$$h_v = \frac{\alpha V^2}{2g} . \quad (2.11)$$

4. Для кожного перерізу обчислюємо за формулою (2.7) повну питому енергію (повний напір), а за формулою (2.8) – втрати повної питомої енергії h_w на подолання гідравлічних опорів. За формулою (2.3) і (2.6) обчислюємо гідравлічний і п'єзометричний похили між перерізами.

5. На листку міліметрового паперу будуємо п'єзометричну і напірну лінії, як це показано на рис. 2.

2.5. Контрольні питання

1. Який рух рідини називають усталеним і неусталеним, плавно-змінним, різко-змінним, рівномірним і нерівномірним, напірним і безнапірним?
2. Для яких видів руху рідини одержано рівняння Д.Бернуллі і чому?
3. Що таке середня швидкість і витрата рідини? Запишіть формули, які пояснюють їх фізичний зміст.
4. Запишіть рівняння Д.Бернуллі для потоку в'язкої рідини і поясніть геометричний і фізичний (енергетичний) зміст членів цього рівняння.
5. Чим є п'єзометрична і напірна лінії?
6. Чим є п'єзометричний і гідродинамічний напори?
7. Що називають п'єзометричним та гідравлічним похилом? Запишіть вирази цих похилів.
8. В якому випадку гідравлічний і п'єзометричний похили будуть однакові?
9. Поясніть, чому п'єзометричний похил може бути як додатнім так і від'ємним, а гідравлічний похил тільки додатнім?
10. Як правильно називається коефіцієнт α , що входить у рівняння Д.Бернуллі? Що враховує α і як визначається, яка його величина?

11. Які практичні задачі можна розв'язати за допомогою рівняння Д. Бернуллі?
12. Який закон з фізичної точки зору виражає рівняння Д. Бернуллі?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РУХУ РІДИНИ В КРУГЛІЙ НАПІРНИЙ ТРУБІ

4.1. Загальні відомості

Під режимом руху розуміють поведінку окремих частинок рідини потоку, тоді як під видом руху розуміють поведінку потоку в цілому.

При протіканні рідини у трубах і каналах мають місце два різних по своєму характеру режими руху - ламінарний і турбулентний.

Ламінарним називаються режим, при якому потік рідини рухається окремими струминками або парами і траєкторії окремих частинок рідини між собою не перетинаються, лінії течії співпадають з траєкторіями частинок.

Турбулентним називається режим, коли струмінь потоку порушується, частинки рідини перемішуються і траєкторії частинок є складними лініями, які перетинаються між собою.

Ламінарний режим спостерігається переважно при русі рідин підвищеної в'язкості (нафти, бітуму, мазуту і т.п.), а також коли рідина рухається через тонкі (капілярні) трубки, наприклад, рух води у порах ґрунту.

У більшості випадків інженерної практики руху води або інших рідин приблизно такої ж в'язкості (гас, спирт і ін.) має місце турбулентний режим. Так, рух води в системах водопостачання і каналізації, в каналах і річках має турбулентний режим.

Наявність ламінарного або турбулентного режиму залежить від швидкості руху, в'язкості рідини і від геометричних розмірів живого перерізу потоку.

Досліди Рейнольдса та інших учених показали, що при поступовому збільшенні швидкості ламінарний режим зберігається лиш до якоїсь певної швидкості, після якої настає турбулентний режим.

При проведенні дослідів у зворотному порядку, тобто при зменшенні швидкості, турбулентний режим зберігається також до якоїсь певної швидкості, після чого переходить у ламінарний.

Швидкість, при якій відбувається зміна режимів руху, називається критичною швидкістю. При цьому розрізняють дві критичні швидкості: нижню $V_{н.к.}$, при якій турбулентний рух переходить у ламінарний, і верхню $V_{в.к.}$, при якій ламінарний рух переходить у турбулентний. Завжди $V_{н.к.} < V_{в.к.}$.

Таким чином, виявлення режиму руху рідини може бути проведено шляхом співставлення середньої швидкості з критичними швидкостями.

На практиці за критерій режиму руху рідини використовують число Рейнольдса, яке позначають символом Re .

Число Рейнольдса – це безрозмірний критерій і виражається залежністю:

$$Re = \frac{Vl}{\nu}, \quad (4.1)$$

де V - середня швидкість руху потоку рідини;

l - деякий характерний геометричний розмір живого перерізу потоку; ν - кінематичний коефіцієнт в'язкості.

Якщо за лінійну характеристику поперечного перерізу русла взяти діаметр труби d , то залежність для числа Рейнольдса буде мати такий вигляд:

$$Re = \frac{Vd}{\nu}. \quad (4.2)$$

Фізичний зміст числа Рейнольдса можна визначити як відношення сил інерції до сил в'язкості. Чим менше число Рейнольдса, тим більший вплив сил в'язкості на рух рідини. Чим більше число Рейнольдса, тим більший вплив сил інерції в потоці в порівнянні з силами в'язкості.

Значення числа Рейнольдса, що відповідає стійкому переходу від турбулентного режиму руху до ламінарного (при нижній критичній швидкості, яку далі будемо називати просто критичною швидкістю

і позначати $V_{кр}$) називають критичним числом Рейнольдса і позначають $Re_{кр}$.

На основі дослідів встановлено, що при русі рідини в круглих гладких трубах перехід від турбулентного режиму руху до ламінарного настає при:

$$Re_{кр} = \frac{V_{кр} d}{\nu} = 2320 . \quad (4.3)$$

Для потоків не круглого перерізу у формули (4.2) і (4.3) замість діаметра d вводиться гідравлічний радіус R , який виражає відношення площі живого перерізу ω до змоченого периметра χ і для круглої труби дорівнює:

$$R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{\pi d^2}{4\pi d} = \frac{d}{4} . \quad (4.4)$$

Тоді критичне число Рейнольдса для потоків, не круглого перерізу буде дорівнювати:

$$Re_{кр} = \frac{V_{кр} R}{\nu} = 580 . \quad (4.5)$$

Це ж критичне значення числа Рейнольдса $Re_{кр} = 580$ приймають і для потоків довільної форми.

Порівнюючи значення числа Рейнольдса, обчислене за формулою (4.2) для даного руху рідини, з критичним числом Рейнольдса, визначають режим руху.

Якщо: $Re < Re_{кр} = 2320$ - режим руху ламінарний;

$Re > Re_{кр} = 2320$ - режим руху турбулентний.

Визначення режиму руху в потоці має практичне значення, бо від нього залежать втрати енергії під час його руху.

При різних режимах руху мають місце різні залежності між втратами енергії (напору) і середніми швидкостями руху. При ламінарному режимі втрати енергії по довжині пропорційні першій степені швидкості, а при турбулентному - швидкості руху рідини в степені m , що знаходиться в межах від 1,75 до 2.

Якщо позначити втрати напору (енергії) по довжині ділянки через h_D , то можна записати:

- при ламінарному режимі:

$$h_D = bV^{m=1} ; \quad (4.6)$$

- при турбулентному режимі:

$$h_D = bV^{m=1,75 \div 2,0} , \quad (4.7)$$

де b - коефіцієнт пропорційності, який враховує вплив розмірів труби, властивості її стінок і види рідини;

m - враховує вплив швидкості руху рідини на втрати енергії в потоці.

4.2. Склад лабораторної роботи

1. Візуальне спостереження ламінарного і турбулентного режимів руху.
2. Визначення за дослідними даними значень числа Рейнольдса для ламінарного і турбулентного режимів і співставлення їх з критичним числом Рейнольдса для підтвердження режиму руху, який спостерігався під час дослідів.
3. Співставлення середньої швидкості з критичною для підтвердження режиму руху, який спостерігається під час дослідів.

4.3. Дослідна установка

Установка для проведення лабораторної роботи складається з напірного резервуара, в якому підтримується рівень води, прозорої скляної трубки і посудини з рідкою фарбою, обладнана регулюючими пристроями для подачі фарби і регулювання витрати води. Для зменшення збурень, що вносяться в потік, вхід у трубку зроблено плавним.

Величина витрати визначається мірним резервуаром. Схема установки показана на рис. 5. Витрата розчину фарби регулюється краном так як і витрата води.

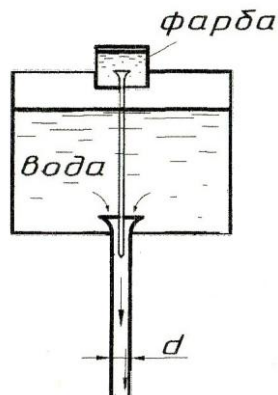


Рис. 5. Схема установки до визначення режимів руху

4.4. Виконання роботи і обробка дослідів

1. Наповнюють напірний резервуар водою до сталого рівня. При незначному відкритті крана на скляній трубці вода з напірного резервуара почне надходити у скляну трубу з певною середньою швидкістю V , що відповідає витраті Q і перерізу труби ω .

Відкривають кран на трубці, яка виходить із малого резервуара з фарбою і з неї почне надходити фарба в скляну трубу у вигляді тонкої прямолінійної струминки, яка не змішується з рештою рідини і різко виділяється, тобто спостерігається ламінарний режим. При цьому вимірюється об'єм W води, який надійшов у мірний резервуар і час T його наповнення, а також температура води $t^{\circ}\text{C}$. Відкривається кран ще далі, при цьому збільшується швидкість, лінія течії стає звислою і при дальшому збільшенні швидкості відбувається перемішування забарвленої струминки з усією масою потоку, струминка швидко розпадається, набуваючи вигляду окремих кільцевих завихрень по всьому перерізу труби, тобто спостерігаються турбулентний режим. При цьому виконуються ті ж виміри, що і при ламінарному режимі.

2. Для кожного режиму руху обчислюють витрата Q і середню швидкість V за формулами

$$Q = \frac{W}{T} \quad \text{і} \quad V = \frac{Q}{\omega}, \quad (4.8)$$

де ω - площа поперечного перерізу скляної труби

$$\omega = \pi d^2 / 4, \quad (4.9)$$

3. По виміряній температурі води $t^{\circ}\text{C}$ визначають кінематичний коефіцієнт в'язкості ν з довідникової літератури.

4. По формулі (4.2) для кожного режиму руху обчислюють число Рейнольдса.

5. Співставляють обчислені по формулі (4.2) числа Рейнольдса з критичним числом Рейнольдса $Re_{кр} = 2320$ і підтверджують режим руху, який спостерігався під час дослідів.

6. Обчислюють критичну швидкість за формулою

$$V_{кр} = \frac{Re_{кр} \nu}{d} = \frac{2320 \cdot \nu}{d}, \quad (4.10)$$

співставляють її з середньою швидкістю і також підтверджують режим руху, що спостерігався, тобто:

$V < V_{кр}$ - режим руху ламінарний;

$V > V_{кр}$ - режим руху турбулентний.

4.5. Контрольні запитання

1. Що таке режим руху рідини? Який режим називається ламінарним, а який - турбулентним?
2. Які фактори впливають на режим руху рідини?
3. Запишіть залежність для визначення числа Рейнольдса і поясніть її фізичний зміст.
4. Чим є критичне число Рейнольдса і яка його величина для трубопроводів і для потоків довільної форми?
5. Як практично визначається режим руху рідини?
6. Що таке критична швидкість і як за допомогою її визначити режим руху рідини?
7. Якій критичній швидкості відповідає критичне число Рейнольдса $Re_{кр} = 2320$?
8. У якій залежності по відношенню до середньої швидкості знаходяться втрати напору по довжині при ламінарному і турбулентному режимах?
9. При якому режимі втрати напору більші і чому?
10. Що таке в'язкість рідини і як вона впливає на величину числа Рейнольдса?
11. Як залежить величина числа Рейнольдса від температури рідини?
12. Яке практичне значення має визначення режиму руху рідини?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ГІДРАВЛІЧНОГО ТЕРТЯ ПРИ РУСІ РІДИНИ В НАПІРНИЙ ТРУБІ

5.1. Загальні відомості

Втрати напору по довжині h_D під час руху в'язкої рідини в напірному трубопроводі визначаються за формулою Вейсбаха-Дарсі

$$h_D = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{V^2}{2g}, \quad (5.1)$$

де λ - коефіцієнт гідравлічного тертя; l - довжина трубопроводу; d - діаметр трубопроводу; V - середня швидкість.

Формула Вейсбаха-Дарсі дійсна як для ламінарного, так і для турбулентного режиму руху. Різними в цих випадках будуть розрахункові залежності для коефіцієнта λ , від правильного вибору величини якого залежить точність гідравлічних розрахунків.

Сучасні розрахункові формули для визначення коефіцієнта λ передбачають залежність цього коефіцієнта в загальному випадку від розмірів поперечного перерізу труб, шорсткості стінок і числа Рейнольдса.

При вивченні факторів, які впливають на значення коефіцієнта λ і теоретичної розробки проблеми руху рідини в трубопроводах, істотне значення мали роботи Прандля, Кармана, Нікурадзе і ін.

Узагальнені результати експериментальних досліджень у вигляді графіків (графіки Нікурадзе, Муріна) приведені в літературі. Ці графіки дозволили в зручній формі узагальнити питання про втрати напору і наочно показати таке:

- 1) коефіцієнт λ у самому загальному випадку залежить тільки від відносної шорсткості і числа Рейнольдса;
- 2) мають місце окремі випадки руху рідини, коли λ залежить або тільки від числа Рейнольдса, або тільки від відносної шорсткості
- 3) мають місце цілком визначені зони сполучення λ і Re , для яких у формулах, які виражають залежність втрат напору по довжині від середньої швидкості ($h_D = bV^m$), показник ступені набуває цілком визначену величину ($m = 1$; $m = 2$ і т.п.).

Розглядаючи графік Нікурадзе, можна зробити наступні висновки. Все поле графіка розбивається на три зони (I, II, III); в межах кожної із цих зон залежність коефіцієнта λ від числа Рейнольдса має свій особливий характер.

Зона I - зона ламінарного режиму. В цій зоні коефіцієнт λ не залежить від шорсткості, а залежить від числа Рейнольдса і визначається за формулою Пуазейля:

$$\lambda = \frac{64}{Re} . \quad (5.2)$$

Втрати напору з цій зоні пропорційні середній швидкості в першій степені, тобто

$$h_D = bV^{m=1} . \quad (5.3)$$

Верхньою границею цієї зони є $Re = 2320$.

Зона II - перехідна зона. В цій зоні відбувається перехід від ламінарного режиму до турбулентного і коефіцієнт λ не залежить від шорсткості, а залежить тільки від числа Рейнольдса і визначається за формулою Н.З. Френзеля:

$$\lambda = \frac{27}{Re^{0,53}} . \quad (5.4)$$

Втрати напору в цій зоні пропорціональні середній швидкості в степені $m = 1,0 \div 1,75$, тобто

$$h_D = bV^{m=1,0 \div 1,75} . \quad (5.5)$$

Границями цієї зони є число Рейнольдса в проміжку $2320 < Re < 4000$.

Ця зона не має практичного значення.

Зона III - зона турбулентного режиму, яка в свою чергу поділяється на три області (1,2,3).

1. Область гладкостінного опору

Потік в цій області уже знаходиться в умовах турбулентного режиму ($Re > 4000$), але ламінарна плівка повністю покриває виступи шорсткості і коефіцієнт λ не залежить від шорсткості, а залежить тільки від числа Рейнольдса і може визначатися за допомогою різних формул. Так, для круглих труб при $4000 < Re < 100\,000$ рекомендується формула Блазіуса

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} . \quad (5.6)$$

Втрати напору в цій області є пропорційними середній швидкості в степені $m = 1,75$, тобто

$$h_D = bV^{m=1,75} . \quad (5.7)$$

2. Область до квадратичного опору

В цій області виступи шорсткості починають оголюватися і виходити за границі ламінарної плівки. Коефіцієнт λ в цій області стає залежним і від шорсткості і від числа Рейнольдса і може визначатися за різними формулами. Найбільшого розповсюдження набула універсальна формула О.Д. Альтшуля:

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25} , \quad (5.8)$$

де Δ - висота виступів шорсткості; Δ/d - відносна шорсткість.

Втрата напору в цій області пропорційні середній швидкості в степені $m = 1,75 \div 2,0$, тобто:

$$h_D = bV^{m=1,75 \div 2,0} . \quad (5.9)$$

Верхньою границею цієї області є $Re = 560 \frac{d}{\Delta}$.

3. Область квадратичного опору

В цій області коефіцієнт λ практично уже не залежить від числа Рейнольдса, а залежить тільки від шорсткості, ламінарна плівка повністю руйнується, виступи шорсткості оголюються і омиваються турбулентним потоком. Для визначення коефіцієнта λ можна використовувати формулу Шифрінсона:

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta}{d} \right)^{0,25} . \quad (5.10)$$

Втрати напору в цій області пропорційні квадрату середньої швидкості:

$$h_D = bV^{m=2,0} . \quad (5.11)$$

Нижньою границею цієї області є $Re = 560 \frac{d}{\Delta}$. Слід відмітити,

що досліди Нікурадзе були проведені в трубах із штучною рівномірно розподіленою шорсткістю. Але труби, які застосовуються на практиці, мають шорсткість неоднакову і

нерівномірну. Тому для характеристики шорсткості внутрішньої поверхні промислових труб при гідравлічних розрахунках використовують поняття так званої еквівалентної шорсткості Δ_e .

Під еквівалентною шорсткістю Δ_e розуміють таку висоту виступів шорсткості, яка дає при розрахунках однакову із заданою шорсткістю величину коефіцієнта гідравлічного тертя λ . Для визначення коефіцієнта λ при розрахунках промислових труб при турбулентному режимі найбільше розповсюдження на практиці набула формула О.Д.Альтшуля в такому вигляді:

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}, \quad (5.12)$$

яка при малих числах Рейнольдса ($Re < 10 d / \Delta_e$) перетворюється у формулу Блазіуса (5.6), а при великих числах Рейнольдса ($Re < 500 d / \Delta_e$) - у формулу Шифрінсона (5.10).

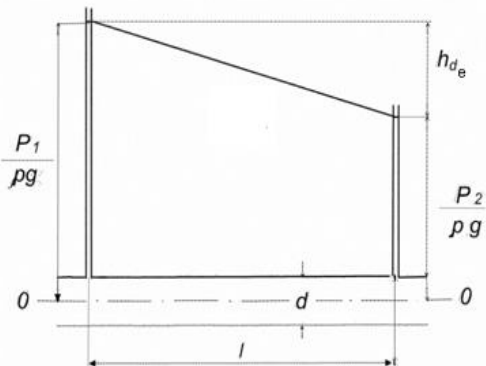
Для визначення коефіцієнта λ використовуються і інші залежності, які приведені в літературі.

5.2. Склад лабораторної роботи

1. Експериментальне визначення коефіцієнта гідравлічного тертя λ для напірної труби сталого перерізу.
2. Порівняння знайденого значення λ з обчисленим за деякими емпіричними формулами, які приведені в цій роботі.

5.3. Дослідна установка

Установка складається із напірного резервуара, горизонтального трубопроводу і мірного резервуара. На трубопроводі розміщені два п'єзометри, а також кран для регулювання витрати води. Рівень води в



напірному резервуарі підтримується сталим. Схема установки показана на рис. 6.

Рис. 6. Схема до визначення коефіцієнта гідравлічного тертя

5.4. Виконання роботи і обробка дослідів

1. Наповнюють напірний резервуар водою так, щоб працював переливний пристрій. За допомогою крана встановлюють певну витрату Q . Вимірюють об'єм води W , який надійшов у мірний резервуар за час T (час T вимірюють секундоміром), а також температура води $t^{\circ}\text{C}$. Знімають показники п'єзометрів, установлених на відстані l . Для проведення другого і наступних дослідів за допомогою крана встановлюють іншу витрату (більшу або меншу) і повторюють виміри.
2. Використовуючи відомі формули (4.8), (4.9), (4.10), обчислюють для кожного дослідів витрату Q і середню швидкість V , а також площу живого перерізу ω .
3. По різниці показів п'єзометрів обчислюють втрати напору по довжині для кожного дослідів, як

$$h_{\text{Д}} = \frac{p_1}{\rho g} - \frac{p_2}{\rho g} . \quad (5.13)$$

4. За виміряною температурою води із таблиці виписується кінематичний коефіцієнт в'язкості ν і обчислюється число Рейнольдса для кожного дослідів за формулою (4.2).
5. Використовуючи формулу Вейсбаха-Дарсі (5.1) обчислюють коефіцієнт $\lambda_{\text{Д}}$ для кожного дослідів.
6. Залежно від величини числа Рейнольдса і відносної шорсткості $\Delta_{\text{е}}/d$ встановлюють зону, або область опорів для кожного дослідів, визначають відповідну емпіричну формулу, за якою обчислюють коефіцієнт λ , значення якого порівнюють з дослідним коефіцієнтом $\lambda_{\text{Д}}$.

5.5. Контрольні запитання

1. Які ви знаєте опори? Наведіть приклади.
2. Які ви знаєте втрати напору і які є методи їх визначення?
3. Як заведено визначати втрати напору відповідно з розрахунковим методом і чому так?
4. Напишіть формули для визначення втрат напору по довжині і місцевих втрат напору і поясніть їх.
5. Що розуміють під гідравлічно гладкими і гідравлічно шорсткими стінками? Чому цей поділ є умовним?
6. Від яких факторів залежить коефіцієнт λ в області гладких труб, в до квадратичній області і в квадратичній області?
7. Яка залежність втрат напору від середньої швидкості в різних зонах і областях опорів?
8. Який існує зв'язок між коефіцієнтом гідравлічного тертя λ і коефіцієнтом Шезі C ?
9. Що таке еквівалентна шорсткість і яка різниця між еквівалентною і абсолютною шорсткістю?
10. Що таке відносна шорсткість?
11. Від яких факторів залежить товщина ламінарної плівки і як вона впливає шорсткість труби?
12. Як впливає діаметр труби з однаковою шорсткістю на величину втрат напору?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6

ВИЗНАЧЕННЯ ВТРАТ НАПОРУ ТА КОЕФІЦІЄНТА ОПОРУ ПРИ РАПТОВОМУ РОЗШИРЕННІ ПОТОКУ В НАПРІННОМУ ТРУБОПРОВОДІ

6.1. Загальні відомості

Місцеві втрати енергії (напору) при русі рідини по трубах і каналах виникають в місцях перешкод на шляху руху. Ці ділянки називають місцевими опорами. До них належать всіляка запірна арматура (вентилі, засувки, крани, клапани); фасонні частини трубопроводів (коліна, розтруби, переходи, трійники, хрестовини тощо), сітки, фільтри, діафрагми та багато інших пристроїв.

Урахування місцевих опорів має велике значення у так званих гідравлічнокоротких трубопроводах, де величина місцевих втрат такого самого порядку, як і величина втрат по довжині.

Основною причиною виникнення місцевих опорів є різка зміна конфігурації потоку рідини на ділянках місцевих опорів, що з кінематичної точки зору означає великі зміни місцевих швидкостей як за величиною, так і за напрямом, тобто виникає пульсація швидкості, яка призводить до різкого збільшення сил тертя, а як відомо, основною причиною виникнення втрат енергії (напору) є робота сил тертя.

Як показують досліди, в багатьох випадках втрати напору приблизно пропорційні квадрату середньої швидкості, а тому в гідравліці прийнято виражати втрати напору пропорційно швидкісному напору. Це вигідно ще й тому, що швидкісний напір входить у рівняння Д. Бернуллі, як і втрати напору.

Місцеві втрати напору визначаються за формулою Ю. Вейсбаха

$$h_M = \zeta \frac{V^2}{2g}, \quad (6.1)$$

де h_M - місцеві втрати напору;

ζ - коефіцієнт місцевого опору, безрозмірний.

Величина коефіцієнта місцевого опору залежить від виду місцевого опору, числа Рейнольдса і, частково, від шорсткості стінок, а для різного роду напірних пристроїв (засувки, крани, та ін.) - і від величини відкриття.

Формула Ю. Вейсбаха передбачає, що коефіцієнт ζ для даного виду місцевих опорів є сталою величиною і не залежить від числа Рейнольдса. Численні експериментальні дослідження показують, що умова $\zeta = \text{const}$ для даного типу місцевого опору повністю справджується тільки для великих чисел Рейнольдса ($Re > 3000 \div 10000$). При невеликих Re , зокрема при ламінарному режимі течії або близькому до нього, величина ζ істотно залежать від Re . У довідниках значення ζ даються сталі для даного виду місцевого опору, тобто такі, що не залежать від Re .

У практиці гідравлічних розрахунків трубопроводів мають справу з числами Рейнольдса, що значно перевищують вказані межі. Тому можна вважати $\zeta = \text{const}$ для кожного виду місцевого

опору. Проте не можна забувати, що в ряді випадків руху, де Re невеликі, необхідно враховувати вплив Re на ζ .

При визначенні місцевих втрат напору за формулою Вейсбаха швидкісний напір вираховують по швидкості за місцевим опором, а коефіцієнт ζ для більшості місцевих опорів, за винятком окремих випадків, визначаються дослідним шляхом.

Раптове розширення потоку є одним із небагатьох випадків місцевих опорів, для котрих формули втрати напору і коефіцієнта опору можуть бути з деякими допущеннями виведені теоретично (рис. 7).

Такою формулою для визначення втрати напору при раптовому розширенні потоку є формула Борда:

$$h_{p.p.} = \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g}, \quad (6.2)$$

яка розшифровується так: втрата напору при раптовому розширенні потоку дорівнює швидкісному напору, який відповідає втраченій швидкості $(V_1 - V_2)$.

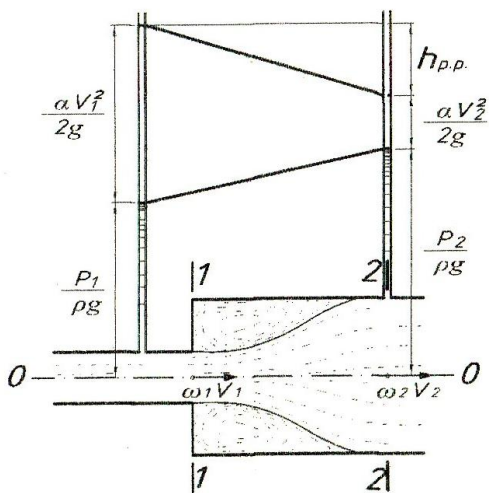


Рис. 7. Схема до визначення місцевих втрат напору

Використовуючи рівняння нерозривності:

$$V_1 \omega_1 = V_2 \omega_2 \quad (6.3)$$

формулу (6.2) можна привести до одного із наступних двох видів:

$$h_{p.p.} = \left(1 - \frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2 \cdot \frac{V_1^2}{2g} \quad (6.4) \quad \text{або} \quad h_{p.p.} = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} - 1\right)^2 \cdot \frac{V_2^2}{2g}, \quad (6.5)$$

Якщо ввести значення

$$\zeta'_{p.p.} = \left(1 - \frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2 \quad (6.6) \quad \text{і} \quad \zeta_{p.p.} = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} - 1\right)^2, \quad (6.7)$$

то залежності (6.4) і (6.5) можуть бути приведені до загального виду формул для визначення втрат напору

$$h_{p.p.} = \zeta'_{p.p.} \cdot \frac{V_1^2}{2g} \quad (6.8) \quad \text{і} \quad h_{p.p.} = \zeta_{p.p.} \cdot \frac{V_2^2}{2g}, \quad (6.9)$$

де $\zeta'_{p.p.}$ - коефіцієнт опору раптового розширення потоку, віднесений до більшої швидкості V_1 , перед розширенням;

$\zeta_{p.p.}$ - коефіцієнт опору раптового розширення потоку, віднесений до меншої швидкості V_2 за розширенням. Таким чином рівняння для визначення втрат напору при раптовому розширенні потоку можна написати в такому загальному вигляді:

$$h_{p.p.} = \zeta'_{p.p.} \cdot \frac{V_1^2}{2g} = \zeta_{p.p.} \cdot \frac{V_2^2}{2g}. \quad (6.10)$$

Так як швидкісні напори будуть різними, то і коефіцієнти опору $\zeta'_{p.p.}$ і $\zeta_{p.p.}$ будуть мати різні значення, але втрати напору, звичайно, будуть однакові.

Залежності (6.8) і (6.9) дозволяють знаходити і дослідні значення коефіцієнтів:

$$\zeta'_{p.p.} = h_{p.p.(\partial)} \bigg/ \frac{V_1^2}{2g} \quad (6.11) \quad \text{і} \quad \zeta_{p.p.} = h_{p.p.(\partial)} \bigg/ \frac{V_2^2}{2g}, \quad (6.12)$$

$h_{p.p.(\partial)}$ - дослідне значення втрати напору при раптовому розширенні потоку, знайдене по різниці повних питомих енергій в перерізах 1-1 і 2-2, тобто:

$$h_{p.p.(\partial)} = \left(z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha V_1^2}{2g} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha V_2^2}{2g} \right) \quad (6.13)$$

Слід відзначити, що теоретичні значення втрат напору при раптовому розширенні трохи відрізняються від дослідних значень. Це пояснюється тим, що при виведенні формули (6.2) були зроблені допущення відносно сил зовнішнього тертя і розподілу тиску в перерізі 1-1.

6.2. Склад лабораторної роботи

Дослідна перевірка теоретичних залежностей (6.2), (6.6) і (6.7), яка проводиться по даних декількох дослідів при різних витратах води.

6.3. Дослідна установка

Установка складається з напірного резервуара, трубопроводу, на якому розмішено раптове розширення (рис. 7) від d_1 , до d_2 , і мірного резервуара для вимірювання витрати води об'ємним способом. Перед розширенням і після нього установлені п'єзометри для вимірювання п'єзометричного напору в перерізах 1-1 і 2-2. Витрата води регулюється краном.

6.4. Виконання роботи і обробка дослідів

1. Для кожного дослідів краном установлюють певну витрату води, яку вимірюють за допомогою мірного резервуара і кожний раз знімають показання п'єзометрів.
2. Використовуючи відомі формули (4.8), (4.9), (4.10), обчислюють для кожного дослідів витрату Q_i середню швидкість V в перерізах 1-1 і 2-2, а також площу цих перерізів ω_1 , і ω_2 .
3. Обчислюють дослідне значення втрати напору за формулою (6.13) для кожного дослідів, а також теоретичне значення втрат напору за формулою (6.2) і порівнюють їх.
4. За формулою (6.12) обчислюють дослідне значення коефіцієнта опору раптового розширення, а за формулою (6.7) - його теоретичне значення і порівнюють їх.

6.5. Контрольні запитання

1. Що являють собою місцеві опори і які їх види ви знаєте?
2. Які основні причини виникнення місцевих опорів і втрати енергії?
3. Як згідно з розрахунковим способом прийнято визначати втрати напору?
4. Від яких факторів залежить коефіцієнт місцевого опору?
5. Що собою являє коефіцієнт місцевого опору, що він показує?

6. В яких випадках коефіцієнт опору залежить від числа Рейнольдса?
7. Чому вода в п'єзометрі за раптовим розширенням піднімається вище ніж в п'єзометрі до розширення?
8. Запишіть формулу Ю.Вейсбаха і поясніть її.
9. Запишіть формулу Борда і розшифруйте її.
10. Чому втрати напору прийнято визначати відносно швидкісного напору?
11. Для яких місцевих опорів коефіцієнти опорів визначаються теоретично?
12. Поясніть об'ємний спосіб визначення витрати води при виконанні лабораторної роботи.

ЛІТЕРАТУРА

1. Науменко І. І., Токар О. І., Токар Л. О. Гідрогазодинаміка. Рівне : НУВГП, 2007. 118 с. URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/1833/>
2. Гідравліка : підручник / ред. Н. С. Науменко. Рівне : РДТУ, 2001. 361 с.
3. Науменко І. І. Технічна механіка рідини і газу : підручник. Рівне, НУВГП, 2009. 376 с.
4. Науменко І. І. Технічна механіка рідини і газу : підручник. Рівне, РДТУ, 2000. 528 с.
5. Луценко В. В. Технічна механіка рідини і газу : навч. посіб. Рівне : НУВГП, 2008. 128 с. URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/5602/>
6. Луценко, В. В. Технічна механіка рідини і газу в тестах і задачах. Рівне : НУВГП, 2015. URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/4033/>
7. Рогалевич Ю. П. Гідравліка : підручник. К. : Вища школа, 2010. 255 с.
8. Константинов Ю. М. Технічна механіка рідини і газу : підручник. К. : Вища школа, 2002.