

7130

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

**ГІДРАВЛІКА,
ГІДРАВЛІЧНІ
МАШИНИ І
ГІДРОПНЕВМОПРИВІД**

(ЧАСТИНА І. ГІДРАВЛІКА І ГІДРАВЛІЧНІ МАШИНИ)

Лабораторний практикум

до виконання лабораторних робіт студентами спеціальностей напрямів:
0902 "Інженерна механіка", 0905 "Енергетика", 0925 "Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології" денної та заочної форм навчання

СХВАЛЕНО

на засіданні кафедри процесів і
апаратів харчових виробництв та
технології консервування
Протокол № 15
від 14.06.2007 р.

Київ НУХТ 2008

Гідравліка, гідравлічні машини і гідропневмопривід. (Частина 1. Гідравліка і гідравлічні машини): Лабораторний практикум до виконання лабораторних робіт студентами спеціальностей напрямів: 0902 "Інженерна механіка", 0905 "Енергетика", 0925 "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології" денної та заочної форм навчання /Уклад.: К.Р.Кулінченко, І.К.Мотуз.- К.: НУХТ, 2008.- 57ш с.

Рецензент С.М.Василенко, д-р техн. наук

Укладачі: В.Р.Кулінченко, д-р техн. наук
І.К.Мотуз

Відповідальний за випуск І.Ф.Малежик, д-р техн. наук, проф.

Видання подається в авторській редакції

ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Навчальні плани фахової підготовки інженерно-технічних працівників переробних галузей сільськогосподарської сировини включають у себе вивчення дисципліни "Гідравліка, гідравлічні машини і гідропневмопривід: Ч.1. Гідравліка і гідравлічні машини". Значення цієї дисципліни в інженерній практиці зростає у зв'язку з насиченістю промислових підприємств машинами і апаратами, які працюють з використанням основних законів гідравліки та гідравлічних машин. Експлуатація промислових машин і апаратів в оптимальному, з економічної точки зору, режимі роботи вимагає від інженерів знань законів перетворення енергії у статичному стані і під час її руху. Тому названий курс передбачає три розділи: гідростатику, гідродинаміку і гідравлічні машини (насоси).

Кваліфікаційні характеристики підготовки спеціалістів харчової промисловості вимагають від інженера оволодіння навичками гідравлічних вимірів, а також експлуатації та проектування гідромеханічного обладнання. На цій підставі навчальні плани передбачають виконання лабораторного практикуму з гідравліки та гідравлічних машин.

Кінцева мета лабораторного практикуму – поглиблене вивчення важливих тем трьох основних розділів курсу і набуття практичного досвіду з гідравлічних досліджень і вимірів.

Лабораторні роботи студенти виконують, зазвичай, після вивчення теоретичного матеріалу відповідної теми і опрацювання інструкції до роботи. Після цього готується *протокол*, який повинен містити такі пункти:

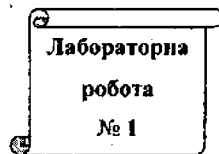
- назву лабораторної роботи;
- визначення мети роботи;
- теорія питання, пов'язана з виконанням лабораторної роботи зі схемою установки і повною специфікацією до неї;
- порядок проведення роботи і методику опрацювання дослідних даних;
- підготувати таблицю для запису результатів вимірів і розрахунків.

Перед виконанням лабораторної роботи викладач в усній чи письмовій формі проводить індивідуальний опит студентів. Непідготовлені студенти, а також ті, які не пройшли інструктаж з техніки безпеки, або ті, що його порушують, до виконання роботи не допускаються.

Опрацьовувати результати вимірів необхідно згідно Міжнародної системи одиниць – ГОСТ 8.417-81 з використанням індивідуальних засобів обчислювальної техніки (інженерні мікрокалькулятори). При цьому особливу увагу необхідно звернути на осмислення фізичного змісту отриманих результатів і оцінки похибки вимірів.

Оформлений звіт лабораторної роботи здається викладачу у визначений ним термін. При самопідготовці до здачі звіту студенту необхідно самостійно відповісти на контрольні запитання, які подаються у кінці кожної лабораторної роботи.

Залік з лабораторного практикуму виставляється після виконання і здачі всіх робіт, які передбачені навчальною програмою курсу.



ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ПОСУДИНИ МАРІОТТА

Мета роботи – дослідним шляхом визначити час підтримування сталого тиску в посудині.

1.1. Основні теоретичні положення

Загальний закон розподілу тиску рідини, яка знаходиться в стані спокою описується рівнянням Ейлера

$$dp = \rho (Xdx + Ydy + Zdz), \quad (1.1)$$

з якого можна отримати рівняння поверхні рівного тиску

$$Xdx + Ydy + Zdz = 0, \quad (1.2)$$

основне рівняння гідростатики

$$z + \frac{p}{\rho g} = H_s \quad (1.3)$$

і закон Паскаля

$$p = p_0 + \rho gh, \quad (1.4)$$

В рівняннях (1.1) і (1.2): X, Y, Z – проекції прискорення масових сил на відповідні осі x, y, z ; в рівнянні (1.4): p_0 – зовнішній тиск, який передається рідиною в усіх напрямках однаково, а h – глибина занурення довільної частки під рівень рідини. Чим глибше занурення цієї частки, тим тиск буде на цій глибині більшим.

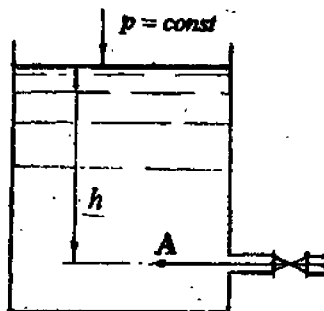


Рис. 1.1. Тиск у точці зануреній на глибину h

Якщо рідина буде витікати з посудини під напором, що поступово зменшується, то h , як показано на рис. 1.1 (точка А), буде весь час зменшуватися. В деяких випадках необхідно при проведенні досліджень підтримувати тиск рідини в посудині сталим. Для цього необхідно:

1) доливати в посудину таку ж саму кількість рідини, яка витікала, тримаючи h величиною сталою;

2) зробити спеціальну конструкцію посудини, яка сама буде підтримувати висоту h сталою. Така за конструкцією посудина називається посудиною Маріотта. Вона являє собою герметично закриту посудину з рідиною, під рівень якої занурена відкрита в атмосферу трубка. Працює така посудина наступним чином.

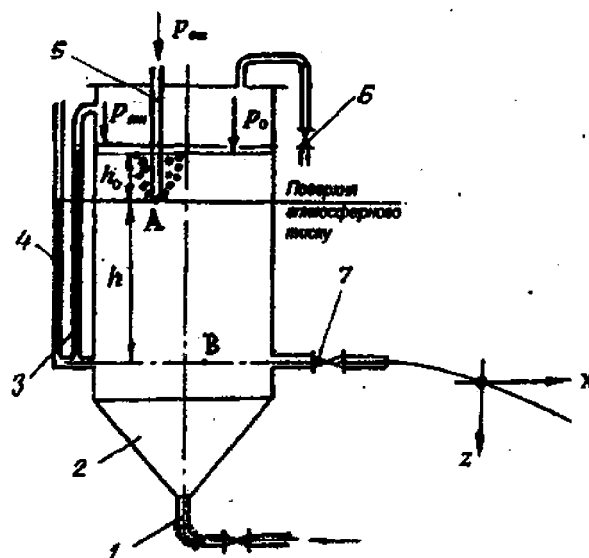


Рис.1.2. Посудина Маріотта

Для наповнення посудини 2 рідиною, відкривають повітряний хідник 6 і вентиль на трубопроводі 1. Після заповнення посудини 2 рідиною (рис. 1.2), закривається повітряний хідник 6.

На поверхні рідини в посудині і в трубці 5 тиск буде дорівнювати атмосферному.

При відкритті вентилі 7 рідина почне витікати з посудини і тиск на її поверхні p_0 стане меншим за атмосферний. В той самий час тиск на поверхні рідини в трубці 5 залишається атмосферним. При подальшому витіканні рідини з посудини 2 тиск на поверхні p_0 буде весь час зменшуватися, а в трубці 5 буде залишатися атмосферним.

Через певний час рівень рідини в трубці дійде до нижнього зрізу трубки і в точці А тиск стане атмосферним. Проведена через точку А площина буде площиною атмосферного тиску (площина рівного тиску). Цей атмосферний тиск буде дорівнювати

$$p_{atm} = p_0 + \rho g h_0, \quad (1.5)$$

звідки тиск на поверхні p_0 дорівнюватиме

$$p_0 = p_{atm} - \rho g h_0 = p_{вак}, \quad (1.6)$$

або

$$p_{\text{ср}} = p_{\text{атм}} - p_0 = \rho g h_0, \quad (1.7)$$

З рівняння (1.6) видно, що над поверхнею рідини створюється розрідження, тому з поверхні атмосферного тиску, (через трубку 5) в цю зону буде всмоктуватися повітря.

Аналізуючи рівняння (1.7) можна зробити висновок, що стовп рідини висотою h_0 не створює тиск на площину атмосферного тиску, тому що врівноважений розрідженням в посудині. Тоді тиск в точці B , під яким рідина витікає з посудини через вентиль 7, є тиском лише стовпа рідини висотою h

$$p_B = p_{atm} + \rho gh = p_{atm} - \rho gh. \quad (1.8)$$

Цей тиск залишається величиною сталою лише до того часу, доки існує рівень h_0 . Коли рівень h_0 опуститься до нижнього зрізу трубки (точка А), тобто $h_0 = 0$, тиск в точці В почне зменшуватися внаслідок зменшення стовпа h .

Занурюючи трубку 5 глибше в посудину, можна довше підтримувати сталий тиск в точці B , але цей тиск буде меншим. Якщо трубка буде занурена до точки B , то рідина перестане витікати з посудини ($h = 0$), а тиск p_B дорівнюватиме атмосферному ($p_B = p_{\text{атм}}$).

Щоб довше підтримувати сталий напір h , можна збільшити висоту h_0 , але не більше 10 м. У цьому випадку вода потрапить в трубку і не дасть можливості надходити повітрю в зону розрідження (повна герметизація посудини).

1.2. Будова і принцип дії лабораторної установки

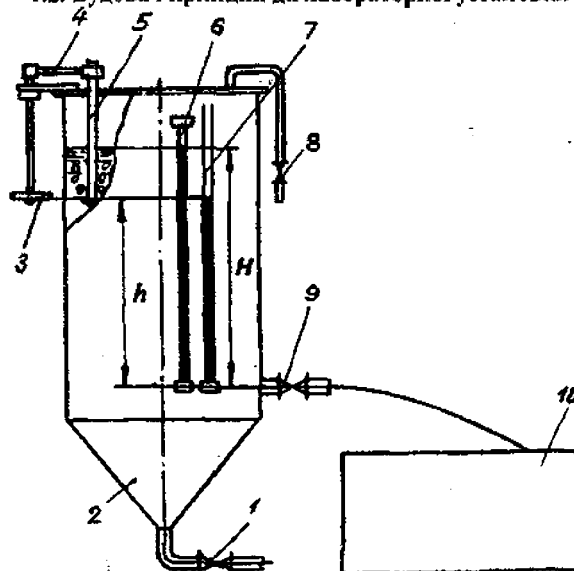


Рис. 1.3. Схема лабораторной установки

Лабораторна установка (рис. 1.3) складається з посудини 2, в яку подається вода через вентиль 1. Верхня частина посудини закрита кришкою на якій змонтовано пристрій 4 з маховичком 3, за допомогою якого можна піднімати чи опускати трубку 5. Також в кришку вмонтовано повітряний хідник 8. Рівень води в посудині і тиск, під яким ця вода витікає через вентиль 9 назовні, вимірюється, відповідно, водомірною трубкою 6 і п'єзометром 7.

1.3. Методика проведення роботи

1. Відкриваємо повітряний хідник 8 і вентиль 1. Наповнюємо посудину водою.
2. Задасмо початковий і кінцевий рівні води за водомірною трубкою 6.
3. Закриваємо повітряний хідник 8 і відкриваємо вентиль на вилив води 9. Коли почне працювати посудина Маріотта, включаємо секундомір і записуємо початкові показники водомірної трубки 6 і п'єзометра 7.
4. Поки рівень води H знижується від верхньої до нижньої відмітки, через рівні проміжки часу записуємо покази водомірної трубки, п'єзометра і секундоміра.
5. Коли рівень води H досягне нижньої відмітки, зупиняємо секундомір, закриваємо вентиль 9 і відкриваємо повітряний хідник 8.

1.4. Методика опрацювання дослідних даних

1. Розраховуємо тиск в отриманих за часом точках
- $$p_i = \rho g H_i$$
2. Будуємо графіки $p_i = f(T)$ і $p_e = f(T)$ на міліметровому папері.
 3. За графіком, приклад якого приведено на рис. 1.4, визначаємо точний час T_0 шляхом перетину ліній тисків p_i і p_e (точка С), на який можна розраховувати тривалість досліді.

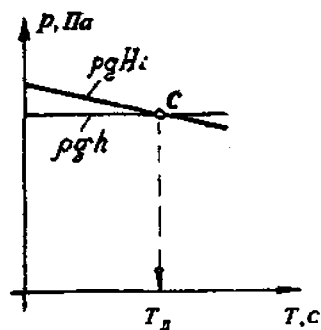


Рис.1.4. Визначення часу підтримання сталого тиску

Отримані дані, результати вимірів і розрахунків заносимо в таблицю 1.1.

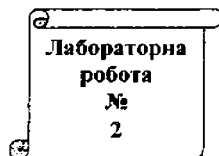
Таблиця 1.1

Таблиця дослідних і розрахункових даних

№ досліджу	Час T , с	Рівень води H_0 , м	Напір h , м	Тиск p , Па	Дійсний час T_0 , с
1					
2					
i					

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Конструкція і принцип дії посудини Маріотта
2. Що покаже п'єзометр, приєднаний до посудини Маріотта, якщо трубка буде занурена нижче рівня витікання рідини?
3. Чому буде дорівнювати тиск витікання рідини з посудини Маріотта, якщо рівень рідини над нижнім зрізом трубки буде становити 10 м чи більшу за 10 м величину?
4. Що покаже п'єзометр, приєднаний до посудини Маріотта, якщо трубка занурена на рівень витікання рідини?



ОБЕРТАННЯ ПОСУДИНИ З РІДИНОЮ НАВКОЛО ВЕРТИКАЛЬНОЇ ОСІ

Мета роботи – дослідним шляхом визначити глибину воронки і частоту обертання посудини, аналітичним шляхом визначити форму поверхні цієї воронки.

2.1. Основні теоретичні положення

Розглянемо циліндричну посудину, наповнену рідиною, яка обертається навколо вертикальної осі зі сталою кутовою швидкістю ω .

В цьому випадку на рідину крім сил тяжіння діють ще відцентрові сили. За рахунок сил тертя стінки посудини, яка обертається, будуть тягнути за собою рідину. По закінченні деякого часу вся рідина почне обертатися з тією ж самою кутовою швидкістю ω і знаходитися по відношенню до стінок посудини в стані спокою. Такий спокій називається відносним. В рідині утворюється воронка, на поверхні якої тиск в усіх точках буде однаковий.

Для того, щоб знайти форму поверхні цієї воронки, запишемо рівняння поверхні рівного тиску

$$Xdx + Ydy + Zdz = 0, \quad (2.1)$$

де X, Y, Z – проєкції прискорення масових сил на осі x, y, z .

На довільно взятій на поверхні воронки точці a (рис.2.1) з координатами x, y, z будуть діяти, як сказано вище, сили: відцентрова $C = m\omega^2 r$ і тяжіння $G = mg$ (m – маса точки, r – відстань її від центральної осі).

Розкладемо відцентрову силу на складові вздовж осей x і y :

$$C_x = m\omega^2 x \text{ і } C_y = m\omega^2 y.$$

Спроектуємо прискорення масових сил на відповідні осі:

$$\text{для сили } C_x: \quad X = \omega^2 x \quad Y = 0 \quad Z = 0;$$

$$\text{для сили } C_y: \quad X = 0 \quad Y = \omega^2 y \quad Z = 0;$$

$$\text{для сили } G: \quad X = 0 \quad Y = 0 \quad Z = -g.$$

Підставимо ці значення в рівняння (2.1)

$$\omega^2 x dx + \omega^2 y dy - g dz = 0.$$

Поділимо всі члени рівняння на g і проінтегруємо

$$\frac{\omega^2 x^2}{2g} + \frac{\omega^2 y^2}{2g} - z' = C \quad (2.2)$$

Винесемо за дужки $\frac{\omega^2}{2g}$ і, маючи на увазі що $x^2 + y^2 = r^2$ (рис.2.1), отримаємо:

$$\frac{\omega^2 r^2}{2g} - z' = C \quad (2.3)$$

При $r = R$ величина z' буде дорівнювати рівню рідини z і рівняння (2.3) набуде вигляду:

$$\frac{\omega^2 R^2}{2g} - z = C \quad (2.4)$$

Рівняння (2.4) – це рівняння, яке описує форму поверхні параболоїда обертання.

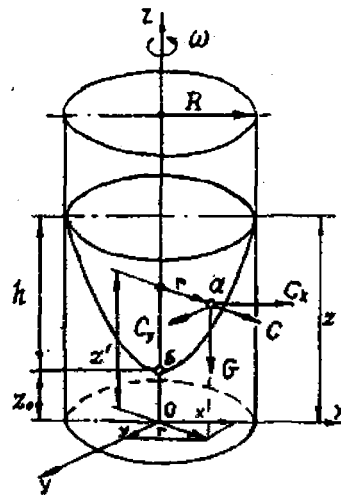


Рис.2.1. Параболоїд обертання

Для визначення глибини воронки цього параболоїда знайдемо сталу інтегрування C . Запишемо рівняння (2.2) для точки b (рис.2.1) з координатами $x = 0$, $y = 0$ і $z = z_0$. Отримаємо $C = -z_0$. Підставивши сталу C у рівняння (2.4), отримаємо:

$$\frac{\omega^2 R^2}{2g} - z = -z_0 \quad \text{або} \quad \frac{\omega^2 R^2}{2g} = z - z_0,$$

звідки

$$h = \frac{\omega^2 R^2}{2g}. \quad (2.5)$$

Максимальна глибина воронки буде у тому випадку, коли її вершина дотикатиметься дна посудини. Це відбувається при певній максимальній частоті обертання

$$h_{\max} = \frac{\omega_{\max}^2 R^2}{2g}, \quad \text{звідки} \quad \omega_{\max} = \frac{1}{R} \sqrt{2gh_{\max}}.$$

Розподіл гідростатичного тиску в рідині підпорядковується рівнянню Л.Ейлера

$$dp = \rho(Xdx + Ydy + Zdz) \quad (2.6)$$

Після розв'язання цього рівняння і визначення сталої інтегрування м.б.мо

$$p = p_{atm} + \rho \frac{\omega^2 R^2}{2} + \rho g(z_0 - z). \quad (2.7)$$

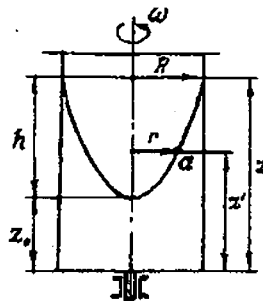


Рис.2.2. До побудови вільної поверхні воронки

Для побудови поверхні воронки необхідно розрахувати величину z' (рис. 2.2) при зміні біжучого радіуса від $r = 0$ до $r = R$, виходячи з рівняння (2.3)

$$z' = \frac{\omega^2 r^2}{2g} - C,$$

оскільки стала $C = -z_0$, то це рівняння набуває вигляду

$$z' = \frac{\omega^2 r^2}{2g} + z_0 \quad (2.8)$$

2.2. Будова і принцип дії лабораторної установки

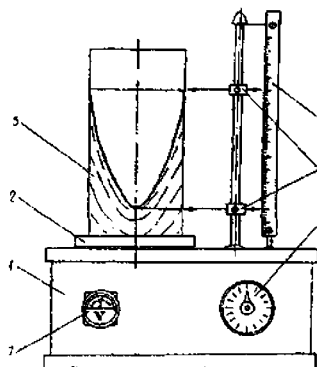


Рис.2.3. Схема лабораторної установки

2.3. Методика проведення роботи

1. Вимірюємо діаметр посудини D .

2. Регулюємо автотрансформатором напругу на електродвигун, щоб він працював при $U \leq 40$ В. Чекаємо встановлення стабільної частоти обертання.
3. За допомогою повзунів вимірюємо висоти нижнього z_0 і верхнього z країв воронки.
4. Автотрансформатором зменшуємо напругу до нуля і виключаємо установку з електричної мережі.

2.4. Методика опрацювання дослідних даних

1. Розраховуємо глибину воронки

$$h = z - z_0$$

2. Визначаємо кутову швидкість обертання посудини

$$\omega = \frac{1}{R} \sqrt{2gh}$$

3. Розраховуємо частоту обертання посудини

$$n = \frac{30\omega}{\pi} = 9,54\omega$$

4. За рівнянням (2.8) обчислюємо величину z' , змінюючи біжучий радіус параболоїда декілька разів від $r = 0$ до $r = R$.

5. Отримані результати вимірів і розрахунків заносять в табл. 2.1.

6. На основі розрахунків за пунктом 4 будуємо форму поверхні воронки на міліметровому папері.

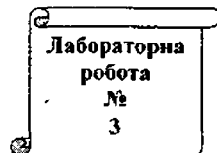
Таблиця 2.1.

Результати вимірів і розрахункові дані

Діаметр посудини D , м	Нижній край воронки z_0 , м	Верхній край воронки z , м	Глибина воронки h , м	Кутова швидкість ω , с^{-1}	Частота обертання n , хв^{-1}	Радіус воронки R , м	Висота рівня на радіусі z' , м

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Який вигляд має поверхня рідини в посудині, що обертається навколо вертикальної осі.
2. Як визначити глибину параболоїда за частотою обертання n .
3. Як розподіляється гідростатичний тиск у рідині при обертанні посудини.
4. Чому дорівнює тиск на дні посудини в її центрі при обертанні.
5. Чому дорівнює тиск на дні посудини біля її стінок при обертанні.



ДОСЛІДНА ПЕРЕВІРКА РІВНЯННЯ БЕРНУЛЛІ

Мета роботи – експериментально підтвердити теоретичні положення на лабораторній установці та побудувати розподіл членів рівняння Бернуллі за перерізами при певній швидкості руху рідини у трубопроводі.

3.1. Основні теоретичні положення

Рівняння Бернуллі – це основне рівняння руху рідин. Воно складається з трьох членів, сума яких є величина стала для різних перерізів потоку ідеальної рідини відносно площини порівняння.

Для елементарної струминки ідеальної рідини це рівняння має вигляд:

$$z + \frac{p}{\rho g} + \frac{U^2}{2g} = \text{idem} = H_d \quad (3.1)$$

де z – геометричний напір, або питома потенціальна енергія положення центра тяжіння живого перерізу відносно площини порівняння, або відстань від горизонтальної в довільному місці проведеної порівняльної площини до центра тяжіння живого перерізу потоку рідини; $\frac{p}{\rho g}$ – п'єзометричний напір, або

питома потенціальна енергія тиску; $\frac{U^2}{2g}$ – швидкісний напір, або питома кінетична енергія.

Сума цих трьох членів рівняння є величиною однаковою (*idem*) і називається гідродинамічним напором (H_d).

Якщо рухається реальна рідина, то гідродинамічний напір не залишається сталим в різних перерізах через втрати частини енергії на подолання різного роду гідравлічних опорів. Це втрати напору за довжиною від одного перерізу до іншого на внутрішнє тертя чи по стінках трубопроводу h_t і місцеві втрати – $h_{\text{л}}$; загальні втрати h_w є їх сумою $h_t + h_{\text{л}}$.

Отже, рівняння Бернуллі для двох перерізів елементарної струминки реальної рідини матиме вигляд:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{U_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{U_2^2}{2g} + h_w, \quad (3.2)$$

$$\text{де } h_w = h_t + h_{\text{л}} = \lambda \cdot \frac{\ell}{d} \cdot \frac{U^2}{2g} + \zeta \cdot \frac{U^2}{2g},$$

тут λ – коефіцієнт опору тертя по довжині; ℓ – відстань між перерізами; d – діаметр труби; ζ – коефіцієнт місцевого опору.

Місцеві швидкості U_1 і U_2 для елементарної струминки у відповідних перерізах є величинами сталими.

Якщо розглядати потік рідини, то швидкості в перерізах не залишаються постійними. Тому рівняння Бернуллі для двох перерізів потоку реальної рідини матиме вигляд:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + h_w,$$

де v_1, v_2 – середні швидкості у відповідних перерізах; α_1 і α_2 – коефіцієнти нерівномірності розподілу швидкостей в перерізах;

Ці коефіцієнти є відношенням дійсної кінетичної енергії до кінетичної енергії, розрахованої за середньою швидкістю:

$$\alpha = \frac{K}{K_{\text{ср}}}$$

Для ламінарного руху рідини в круглих трубах коефіцієнт $\alpha = 2$, для турбулентного $\alpha = 1,03 \dots 1,1$. На практиці для турбулентного руху α приймають за одиницю ($\alpha = 1$).

Розглянемо круглу трубу змінного перерізу (рис.3.1). Перерізи I, II і III мають діаметри d_1, d_2, d_3 . Розглянемо на цьому рисунку зміну членів рівняння Бернуллі від першого перерізу до інших. Запишемо рівняння для трьох перерізів:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + h_{1-2} = z_3 + \frac{p_3}{\rho g} + \alpha_3 \frac{v_3^2}{2g} + h_{1-3}.$$

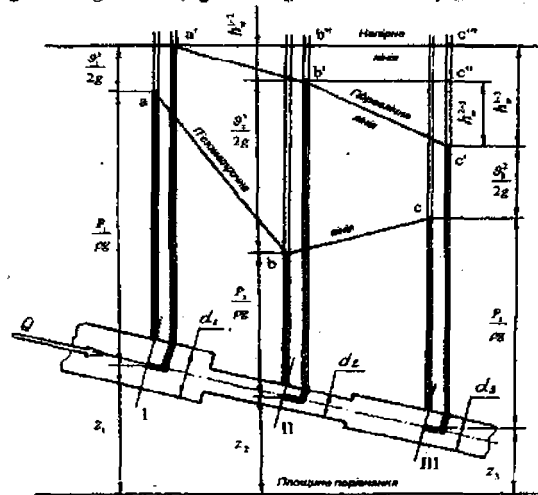


Рис.3.1. Геометричне тлумачення рівняння Бернуллі

Проведемо площину порівняння (завжди горизонтальна площина). Відстань від центрів тяжіння перерізів до площини порівняння – це геометричні

напори $z_1 > z_2 > z_3$. Якби труба була горизонтальною, то $z_1 = z_2 = z_3$. Тоді площину порівняння доцільно було б провести по осі труби.

Для того щоб пояснити розподіл п'єзометричних $\frac{p}{\rho g}$ і гідродинамічних напорів, підключимо до кожного перерізу п'єзометри та гідродинамічні трубки. П'єзометри підключаються таким чином, щоб їх кінці розміщувались заодно з внутрішньою твірною поверхні труби. Гідродинамічні трубки входять всередину труби перпендикулярно до осі, їх вимірювальні кінці повернуті назустріч потоку під кутом 90° і знаходяться в центрі тяжіння перерізів. Застосуємо закони збереження енергії та нерозривності потоку. Припустимо,

що при швидкості v_1 у перерізі I напори z_1 , $\frac{p_1}{\rho g}$ і $\frac{v_1^2}{2g}$ розподілилися так, як це

показано на рис.3.1. У цьому перерізі втрати напору $h_w = 0$ (початок відліку).

У перерізі II труба має найменший діаметр ($d_2 < d_1$). Відповідно до зазначених законів, швидкість v_2 підвищиться, а тиск зменшиться. Отже, $z_2 < z_1$ (труба має гідравлічний уклон), $\frac{p_2}{\rho g} < \frac{p_1}{\rho g}$, $\frac{v_2^2}{2g} > \frac{v_1^2}{2g}$ (відповідно відрізки k_2b і bb'').

На відстані між I і II перерізами з'являються втрати напору h_w^{1-2} , які на рисунку позначено відрізком $b'b''$. У перерізі III діаметр d_3 більший за діаметр d_2 , але менший за d_1 . Отже, $z_3 < z_2$; $\frac{p_3}{\rho g} > \frac{p_2}{\rho g}$ і $\frac{p_3}{\rho g} < \frac{p_1}{\rho g}$, а $\frac{v_3^2}{2g} < \frac{v_2^2}{2g}$ і $\frac{v_3^2}{2g} > \frac{v_1^2}{2g}$.

Втрати напору від II до III перерізу h_w^{2-3} позначено на рисунку відрізком $c'c''$, а від I до III – відрізком $c'c'''$ (h_w^{1-3}).

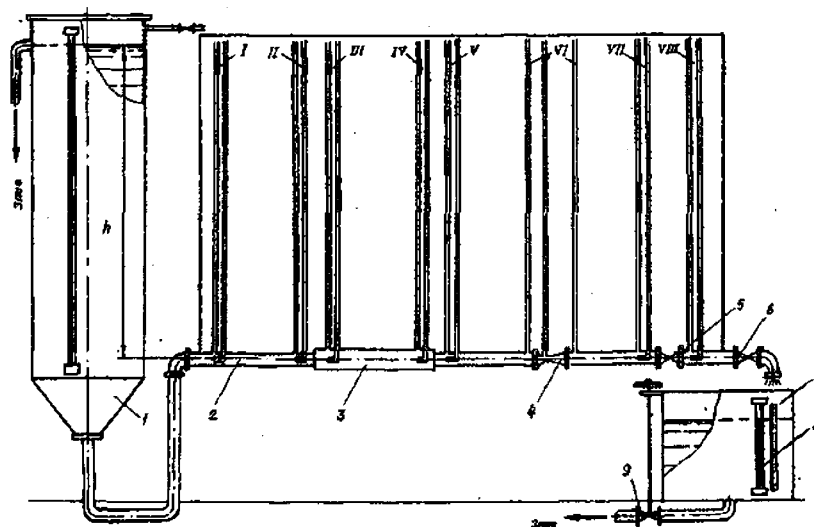
Ламана лінія abc є лінією зміни п'єзометричного напору і називається п'єзометричною лінією; лінія $a'b'c'$ означає зміну гідродинамічного напору і називається гідравлічною лінією, або лінією втрат напору. Горизонтальна лінія $a'b''c'''$ – напірна лінія чи лінія наявного напору, чи повна енергія замкненої системи.

3.2. Будова і принцип дії лабораторної установки

З великої посудини 1 (рис.3.2) вода під напором h потрапляє в горизонтальний трубопровід 2, який складається з кількох прямих ділянок і місцевих опорів. На початку та в кінці кожної прямої ділянки трубопроводу, а також до і після місцевого опору підключено п'єзометри (ліві трубки) і гідродинамічні трубки (праві). Разом трубки створюють трубку Піто.

Винятком є витратомір Вентурі 4, де встановлено три п'єзометри. Вода з труби потрапляє у вимірювальну посудину 7, а з неї на злив через вентиль 9.

Швидкість або витрата рідини регулюється вентилем 6.



3.3. Методика проведення роботи

1. Відкриваємо вентиль 6 і встановлюємо довільну швидкість води в трубі. Для того щоб рух води був усталеним, треба відкрити вентиль подачі води таким чином, щоб рівень води в посудині 1 весь час був однаковим ($h = \text{const}$). Спостерігати цей рівень треба за водомірним склом на посудині 1.

2. Закриваємо клапан 9. Коли рівень води в посудині 7 підніметься і його буде видно за рівнемірор 8, включаємо секундомір і подаємо сигнал про початок дослідів.

3. Через кожні 30 с від початку досліду подаємо сигнал, за яким знімаємо покази з усіх груп трубок. Сигнали подаємо доти, поки в посудину 7 не наблизить запланований об'єм рідини (новий рівень води в посудині 7). При цьому секундомір зупиняємо.

3.4. Методика опрацювання дослідних даних

1. Визначаємо витрати рідини, $\text{м}^3/\text{с}$:

$$Q = \frac{V}{T},$$

де V – об'єм рідини в посудині 7, який визначається за різницею показів рівнеміра 8 і площею посудини; $V = (h_2 - h_1)F_n$; h_1 – початковий рівень води, h_2 – кінцевий рівень води, D – діаметр посудини

$$F_n = \frac{\pi D^2}{4}$$

2. Розрахуємо швидкість руху рідини в трубопроводі:

$$v = \frac{Q}{F},$$

де F – площа живого перерізу потоку рідини в трубопроводі.

3. Обчислюємо середні покази кожної трубки окремо.

4. Викреслюємо рис.3.2 на міліметровці формату А4 і будуємо на ньому п'єзометричну і гідравлічну лінії за показами п'єзометричних і гідродинамічних трубок.

Отримані результати вимірів і розрахунків заносять в табл.3.1

Таблиця 3.1

Результати вимірів і розрахункові дані										
На- пір	Середні показники трубок за групами								Рівень, м	
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	h_1	h_2
H_k										
H_d										

Продовження табл.3.1

Об'єм води, $V, \text{ м}^3$	Час досліду, $T, \text{ с}$	Витрати води, $Q, \text{ м}^3/\text{с}$	Площа труби, $F, \text{ м}^2$	Швидкість води, $v, \text{ м/с}$

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що таке усталений і неусталений рух?
2. Чи можна застосовувати рівняння Бернуллі при неусталеному русі?
3. Умови застосування рівняння Бернуллі.
4. Який вигляд матиме рівняння Бернуллі, якщо вода в трубі не буде рухатися?
5. Чому п'єзометр встановлюється одним кінцем за одне з внутрішню поверхню труби?
6. Що показуватиме гідродинамічна трубка, якщо її кінець встановити за потоком рідини?
7. Що таке трубка Піто? Як нею визначити швидкість?

Лабораторна
робота
№
4

ГРАДУЮВАННЯ ВИТРАТОМІРА ВЕНТУРІ

Мета роботи вивчити будову, принцип дії методу градування витратоміра Вентурі.
Визначити поправочний коефіцієнт у межах досліджуваних середніх швидкостей потоку і витрати рідини.

4.1. Основні теоретичні положення

Найпоширенішим способом визначення витрат рідини є спосіб вимірювання витрат при напірному русі за перепадом тисків у звужувальному пристрої. При звуженні потоку частина потенціальної енергії тиску рідини (п'єзометричного напору) перетворюється в кінетичну енергію (швидкісний напір). За рахунок цього збільшується швидкість у звуженому перерізі. За зміною п'єзометричного напору Δh роблять висновки про витрати рідини Q .

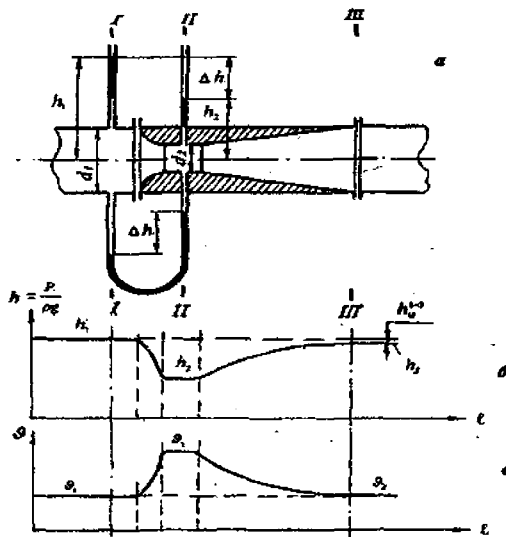


Рис. 4.1. Витратомір Вентурі (а), розподіл тиску (б) і швидкості (в) на шляху потоку рідини

Витратомір Вентурі (рис. 4.1, а) не що інше як трубка змінного за довжиною перерізом з плавним входом, звуженою циліндричною ділянкою і плавним конічним виходом (дифузорею). Його ставлять на прямих горизонтальних ділянках трубопроводів. Довжина прямолинійної ділянки, де

монтується витратомір, повинна перевищувати 20 діаметрів труби до нього і не менше 5 діаметрів після нього. Перепад п'єзометричного напору Δh вимірюють диференціальним манометром, інколи двома п'єзометрами -- при малих тисках у трубопроводі.

Для труб діаметром 50 мм і більше виготовлюють стандартизовані витратоміри із стандартними градуйкованими характеристиками $Q = f(\Delta h)$. Нестандартні витратоміри вимагають індивідуального градуювання.

Розглянемо зміну потенціальної і кінетичної енергії потоку рідини, яка тече через звужуючу частину витратоміра. У звуженій циліндричній частині середня швидкість потоку найбільша, а п'єзометричний напір -- найменший (рис.4.1,б,в). Далі, при розширенні потоку в дифузорі, його швидкість зменшується до початкового значення. Оскільки частина потенціальної енергії губиться на подолання гідравлічного опору дифузору h_w^{1-3} при розширенні потоку, то тиск в переріз III не досягає тиску в перерізі I на цю ж величину h_w^{1-3} . У витратомірі Вентурі втрата h_w^{1-2} незначна, порівнянно з іншими типами звужуючих пристроїв, це досягається завдяки тому, що вхідна частина відтворює своїм обрисом форму потоку при вході в отвір і тому $h_w^{1-2} \approx 0$, і нею можна знехтувати.

Запишемо рівняння Бернуллі для двох перерізів потоку, проведених через точки виміру п'єзометричного напору (рис.4.1,а). Перший переріз (I) перед звуженням, II -- на горизонтальній звуженій частині витратоміра:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + h_w^{1-2}. \quad (4.1)$$

Для горизонтального трубопроводу $z_1 = z_2$; $\alpha_1 = \alpha_2 \approx 1$; $h_w^{1-2} \approx 0$, за цих умов рівняння (4.1) набуває вигляду:

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g}. \quad (4.2)$$

П'єзометри, які приєднані у вибраних перерізах, показують стовп рідини

$$h_1 = \frac{p_1}{\rho g}, \quad h_2 = \frac{p_2}{\rho g}, \quad \Delta h = \frac{p_1 - p_2}{\rho g}. \quad (4.3)$$

На підставі закону нерозривності потоку $Q = v_1 F_1 = v_2 F_2$, і приймаючи до уваги, що

$$F_2 / F_1 = m,$$

де m -- відносна площа звуження перерізів ($m = 0,05 \dots 0,7$), можна записати:

$$v_1 = \frac{Q}{F_1}, \quad v_2 = \frac{Q}{F_2} = \frac{Q}{F_1 m}. \quad (4.4)$$

Підставляючи п'єзометричні напори з рівнянь (4.3) і середні швидкості з (4.4) в рівняння (4.2), отримаємо:

$$\Delta h = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} = \left[\left(\frac{Q}{F_2 m} \right)^2 - \left(\frac{Q}{F_1} \right)^2 \right] \frac{1}{2g} = \frac{Q^2}{2g F_1^2} \left(\frac{1}{m^2} - 1 \right),$$

звідки розрахункові витрати становлять

$$Q_p = \sqrt{\frac{2g F_1^2}{\frac{1}{m^2} - 1}} \sqrt{\Delta h} = C \sqrt{\Delta h}, \quad (4.5)$$

де перший радикал є сталою величиною C для даної системи.

Фактичні витрати будуть менші розрахункових. Їх відношення дає поправку тарування:

$$\mu = Q_d / Q_p.$$

де $\mu < 1$ – тарувальний коефіцієнт, $\mu = 0,95 \dots 0,97$.

4.2. Будова і принцип дії лабораторної установки

Для градуювання витратоміра Вентурі використовуємо лабораторну установку, схема якої приведена на рис.4.2. Установка складається з напірної посудини Маріотта 1, горизонтального трубопроводу 2 з витратоміром Вентурі 3 і мірної посудини 5. Із посудини Маріотта 1 при усталеному русі вода через трубопровід 2 потрапляє у мірну посудину 5.

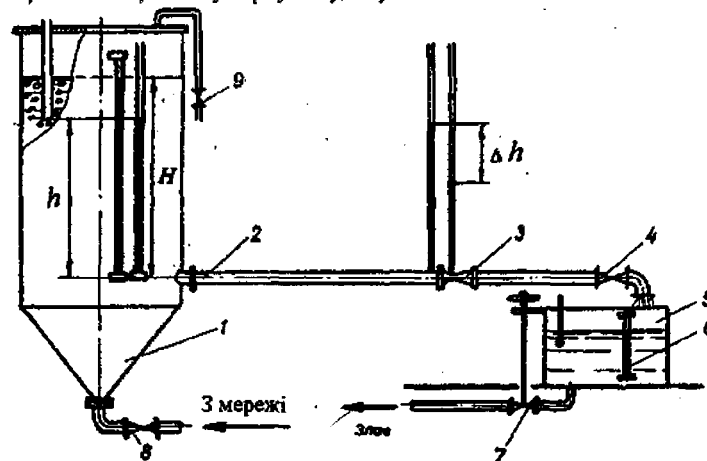


Рис.4.2. Схема лабораторної установки

Витрати води через робочий трубопровід, а значить і через витратомір Вентурі 3 регулюються вентилем 4. Вимірювання витрат здійснюються об'ємним шляхом за допомогою мірної посудини 5 з рівнеміром 6. Мірна посудина випорожнюється в каналізацію через вентиль 7.

П'єзометричні напори до витратоміра 3 і в його звуженому перерізі вимірюються п'єзометрами.

4.3. Методика проведення роботи

1. Відкриваємо повітряний хідник 9 і вентиль 8; при цьому відбувається заповнення посудини Маріотта водою до необхідної висоти вільної поверхні.
2. Закриваємо набірний вентиль 8 і повітряний хідник 9.
3. Закриваємо вентиль 7 на злив із мірної посудини.
4. Відкриваємо вентиль 4 робочого трубопроводу 2 так, щоб досягти заданого викладачем п'єзометричного напору h_1 перед витратоміром Вентурі (див. рис.4.1).
5. З моменту, коли показники п'єзометрів стануть незмінними у часі, вважаємо рух води у трубопроводі ustalеним і розпочинаємо виміри.
6. Фіксуємо початковий рівень води h_n в мірній посудині 5 і включаємо секундомір.
7. Заміряємо п'єзометричні напори перед звуженням h_1 і у звуженому перерізі h_2 витратоміра.
8. Після досягнення заданого рівня води у мірній посудині h_n , зупиняємо секундомір і визначаємо час проведення дослідів.
9. Досліди повторюють 4...6 разів, згідно з пп. 4...8, при інших показниках п'єзометра h_1 .
10. Після закінчення дослідів закриваємо вентиль 4 і відкриваємо вентилі 7 і 9, залишаючи їх відкритими.

4.4. Методика опрацювання дослідних даних

1. Визначаємо зміну рівня води у мірній посудині за час дослідів:

$$\Delta h_B = h_n - h_n.$$

2. Розраховуємо об'єм води, який потрапив у мірну посудину протягом дослідів:

$$V = \Delta h_B \frac{\pi D^2}{4} = 0,785 D^2 \Delta h_B,$$

де D – діаметр мірної посудини.

3. Знаходимо дійсні витрати води за час дослідів:

$$Q_d = V/T,$$

де T – тривалість дослідів.

4. Обчислюємо середню різницю показників п'єзометрів:

$$\Delta h = h_1 - h_2.$$

5. Розраховують площу живого перерізу трубопроводу F_1 і звуженого перерізу витратоміра Вентурі F_2 :

$$F_1 = \pi d_1^2 / 4, \quad F_2 = \pi d_2^2 / 4.$$

6. Визначаємо відносну площу звуження перерізів:

$$m = F_2 / F_1 = d_2^2 / d_1^2.$$

7. Розраховуємо сталу величину витратоміра Вентурі:

$$C = \sqrt{\frac{2gF_1^2}{\frac{1}{m^2} - 1}}.$$

8. Визначаємо розрахункові витрати води:

$$Q_p = C \sqrt{\Delta h}.$$

9. Розраховуємо значення тарувального коефіцієнта витратоміра Вентурі:

$$\mu = Q_a / Q_p.$$

10. На підставі отриманих даних на міліметровому папері в координатах Q – Δh будемо розрахункову $Q_p = f(\Delta h)$ і дійсну $Q_a = f(\Delta h)$ градувальні характеристики витратоміра Вентурі.

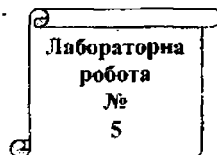
Отримані результати вимірів і розрахунків заносимо в табл.4.1.

Таблиця 4.1

Результати вимірів і розрахункові дані						
№ п/п	Величина	Одини- ця	Значення			
			1	2	3	4
1.	Кінцевий рівень у мірній посудині, h_k	м				
2.	Початковий рівень у мірній посудині, h_n	м				
3.	Висота набраної води у посудині, Δh_n	м				
4.	Діаметр мірної посудини, D	м				
5.	Об'єм набраної води в посудині, V	м ³				
6.	Тривалість досліду, T	с				
7.	Дійсні витрати води, Q_a	м ³ /с				
8.	Покази п'єзометра до витратоміра, h_1	м				
9.	Покази п'єзометра на витратомірі, h_2	м				
10.	Різниця показників п'єзометрів, Δh	м				
11.	Діаметр трубопроводу, d_1	м				
12.	Площа перерізу трубопроводу, F_1	м ²				
13.	Діаметр звуження витратоміра, d_2	м				
14.	Площа звуженого перерізу витратоміра, F_2	м ²				
15.	Відносна площа звуження, m	—				
16.	Стала витратоміра Вентурі, C	м ^{1.5} ·с ^{0.5}				
17.	Розрахункові витрати води, Q_p	м ³ /с				
18.	Коефіцієнт тарування	—				

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

- 1.Способи визначення витрат рідини.
- 2.Витратомір Вентурі, будова і принцип дії.
- 3.Місце встановлення витратомірних пристроїв.
- 4.Зміна енергій рідини при проходженні її через витратомір Вентурі.
- 5.Розрахункові витрати і їх визначення.
- 6.Визначення дійсних витрат.
- 7.Конструкція і принцип дії дослідної установки.
- 8.Методика проведення роботи.
- 9.Методика опрацювання дослідних даних.



ВИЗНАЧЕННЯ РЕЖИМІВ РУХУ РІДИНИ У ПОТОЦІ

Мета роботи – візуально спостерігати ламінарний і турбулентний режими руху і на досліді визначити для них числа Рейнольдса.

5.1. Основні теоретичні положення

Г.Хаген у 1869 р. вперше відзначив, що рух рідин може відбуватися по різному. Д.І.Менделєєв у 1880 р. у своїй роботі "Про опір рідини і про повітроплавання" відзначив дуже важливу обставину, яку покладено в основу сучасної гідравліки: "Безперечно, однак, що в дослідах, виконаних у тонких капілярних трубках, сила сповільнення, тобто тертя, виявляється майже пропорційною першому степеню швидкості, а в широких трубках – майже квадрату швидкості". Отже, вже Д.І.Менделєєв передбачив наявність двох режимів руху рідини. Подальші дослідження режимів руху рідин виконані англійським фізиком О.Рейнольдсом і опубліковані в 1883 р.

Виявлено два режими руху: ламінарний (з латинської *lamina* – шар), при якому спостерігається шаруватий рух рідини, і в цьому разі частки рідини не змішуються між собою; турбулентний (з латинської *turbulentus* – невпорядкований), при якому частинки рідини при русі змішуються між собою. Перехід від ламінарного до турбулентного режиму руху відбувається при перевищенні певної критичної швидкості $U_{кр}$.

При швидкостях менших критичного значення, тобто при $U < U_{кр}$, частинки рідини рухаються паралельно одна одній і відбувається ламінарний режим руху (рис.5.1). При цьому максимальна швидкість потоку встановлюється на осі труби. Епюра швидкості має форму параболи, а середня швидкість $U = 0,5 U_{max}$.

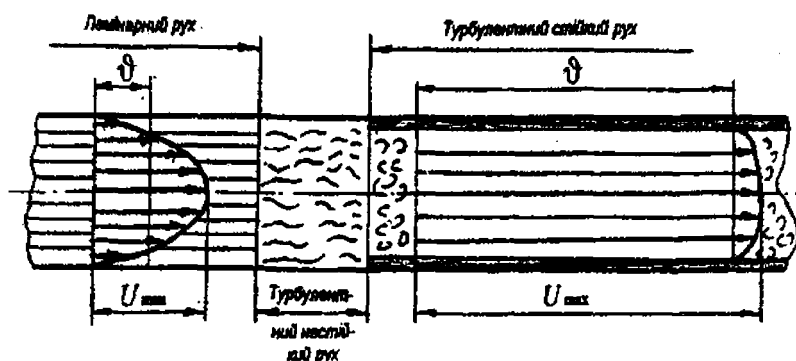


Рис.5.1. Режими руху рідини

Середньою швидкістю в цьому перерізі потоку є така фіктивна, однакова в усіх точках перерізу швидкість, при якій через даний живий переріз проходить така сама кількість рідини, що й при дійсному розподілі швидкостей.

При перевищенні критичного значення швидкості $U > U_{кр}$ відбувається хвильовий рух окремих частинок рідини (рис.5.1).

Подальше збільшення швидкості потоку $U \gg U_{кр}$ приводить до повністю хаотичного руху частинок рідини, тобто до розвиненого турбулентного руху (див. рис.5.1). Епіюра осереднених швидкостей характеризується такими закономірностями:

- швидкості на поверхні труби дорівнюють нулю внаслідок адгезії (прилипання) частинок рідини до стінок;
- на незначній відстані від стінки (у пристінному шарі) швидкості різко збільшуються і досягають значної величини, а на межі з ядром турбулентного потоку мало відрізняються від значень швидкості в ньому;
- у ядрі турбулентного потоку, більш віддаленому від поверхні стінки, швидкості змінюються незначно, що пояснюється турбулентним переносом частинок рідини.

Середня швидкість турбулентного потоку становить

$$U = (0,75 \dots 0,90) \cdot U_{\max}.$$

Кожний з режимів руху характеризується числом подібності Рейнольдса:

$$Re = \frac{U \cdot \ell}{\nu}, Re = \frac{U \cdot \ell \cdot \rho}{\mu}, \quad (5.1)$$

де U – середня швидкість потоку рідини, м/с; ℓ – характерний лінійний розмір, м; ρ – густина рідини, кг/м³; μ – динамічний коефіцієнт в'язкості, Па·с; ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості, м²/с. Для труб круглого перерізу замість лінійного розміру ℓ ставиться діаметр труби d , м. Тоді число Re набуває вигляду:

$$Re = \frac{U \cdot d}{\nu}. \quad (5.2)$$

Дослідним шляхом встановлено, що при числі $Re \leq 2320$ у круглій трубі при напірному русі рідини відбувається сталий ламінарний режим. В ідеальних лабораторних умовах можна спостерігати такий режим руху до $Re = 20000$, але при цьому ламінарний режим нестійкий. Досить незначних збурень в системі, щоб рух перейшов у турбулентний. Зворотне перетворення неможливе.

Вважається, що при $2320 < Re < 13800$ відбувається нестійкий турбулентний рух, а при $Re > 13800$ – явно виражений турбулентний режим руху.

Оскільки в перехідній зоні ламінарний режим руху нестійкий і легко переходить у турбулентний, то за критичне значення числа беруть $Re_{кр} = 2320$.

Для конкретних умов руху рідини в круглих трубах завжди можна знайти дійсне значення числа Re за залежністю (5.2) і, порівнюючи з критичним значенням, визначити режим руху:

при $Re \leq Re_{кр}$ – режим руху ламінарний;

при $Re > Re_{кр}$ – режим руху турбулентний.

Для відкритих каналів, лотків, русел, труб не круглого чи круглого перерізу при безнапірному русі характерним лінійним розміром залежності (5.1) може бути гідравлічний радіус R , а у трубах не круглого перерізу при напірному русі – приведений діаметр $d_{пр}$. Гідравлічним радіусом називається відношення площі живого перерізу потоку до змоченого периметра: $R = \frac{F}{\chi}$. Для

труб круглого перерізу $F = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$ і $\chi = \pi \cdot d$, то $R = \frac{\pi \cdot d^2}{4 \cdot \pi d} = \frac{d}{4}$.

Для напірного руху рідини в трубах не круглого перерізу для визначення числа Re використовується приведений діаметр $d_{пр}$. Приведеним діаметром називається діаметр такого кола, площа якого дорівнює площі розглядуваного перерізу, якщо площа перерізу $F = \frac{\pi \cdot d_{пр}^2}{4}$, то приведений діаметр $d_{пр} = \sqrt{\frac{4F}{\pi}}$.

При прийнятих позначеннях число Рейнольдса має вигляд:

$$Re_R = \frac{v \cdot R}{\nu}, \text{ чи } Re_{пр} = \frac{v \cdot d_{пр}}{\nu}.$$

У цих випадках відповідні критичні значення числа Re будуть іншими.

5.2. Будова і принцип дії лабораторної установки

Конструкцію лабораторної установки показано на рис.5.2. Для візуального спостереження режиму руху рідини установка обладнана великою відкритою посудиною 12, скляною трубою постійного діаметра 8 з краном 9 для регулювання кількості рідини, яка потрапляє з посудини в трубу через плавно виконаний вхід у вигляді воронки 7. Над посудиною 12 укріплено бачок 3 з трубкою 5, звужений кінець якої входить у воронку по осі труби 8. У бачок 3 наливається забарвлена рідина. Рідина, що проходить із посудини 12 через трубу 8, потрапляє в таровану посудину 10, встановлену на вагах 11. Температуру, від якої залежить в'язкість рідини, вимірюють термометром 6. Подача води в посудину 12 регулюється краном 2, встановленим на підвідній трубі. Постійний рівень води в посудині 12 для створення усталеного руху в трубі 8 підтримується за рахунок переливного пристрою 1.

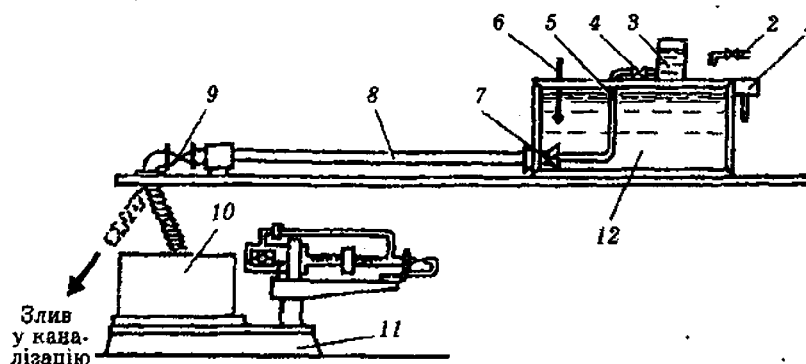


Рис.5.2. Схема лабораторної установки

При незначному відкритті крана 9 із посудини 12 почне витікати рідина через трубу 8; в ній установлюється середня швидкість, яка відповідає певним витратам. Далі трохи відкриємо кран 4, щоб з верхнього бачка 3 витікала забарвлена рідина. За цих умов у трубі 8 почне рухатися тонка забарвлена прямолінійна струминка, яка не змішується з основною масою рідини (див. рис.5.1), тобто відбувається ламінарний режим руху.

Подальше відкривання крана 9 приводить до збільшення середньої швидкості потоку, внаслідок чого струминка набуває вигляду хвилі, розривається на окремих ділянках. При цих витратах наочно підтверджується наявність нестійкого турбулентного руху рідини.

При ще більшому відкриванні крана 9 забарвлена струминка повністю руйнується, а вся маса рідини в скляній трубі забарвлюється, тобто спостерігається стійкий турбулентний режим.

5.3. Методика проведення роботи

1. Трохи відкриваємо кран 9, створюючи незначні витрати води по трубі 8. При цьому воду спрямовуємо на злив у каналізацію.

2. Відкриваємо кран 4 на трубі із забарвленого рідиною настільки, щоб отримати тонку струминку фарби, що підтверджує наявність струминного, ламінарного режиму руху.

3. Спрямовуємо воду з труби 8 у таровану посудину 10 і одразу включаємо секундомір. Набравши задану викладачем кількість води зупиняємо секундомір.

4. Вимірюємо температуру води в посудині 12 термометром 6.

5. Воду із тарованої посудини спрямовуємо на злив.

6. Дослід повторюємо при більшій швидкості води, яка відповідає турбулентному режиму руху.

5.4. Методика опрацювання дослідних даних

1. Розраховуємо витрати рідини у кожному досліді:

$$Q = \frac{V}{T}, \quad \text{де}$$

$V = \frac{G}{\gamma}$ – об'єм води, який потрапляє в таровану посудину 10 за час дослід, м³; G – вага рідини в посудині 10, кгс; γ – питома вага рідини, кгс/м³; T – час проведення дослід, с.

2. Знаходимо площу F живого перерізу скляної труби 8 при відомому діаметрі $d = 0,02$ м.

3. Визначаємо середню швидкість руху води для кожної встановленої витрати, м/с:

$$v = \frac{Q}{F};$$

де Q – об'ємні витрати води для кожного дослід, м³/с; F – площа живого перерізу труби 8, м².

4. Залежно від температури визначаємо кінематичний коефіцієнт в'язкості води за табл.5.2.

5. Знаходимо числа Рейнольдса для досліджених режимів руху і порівнюємо їх з критичним значенням числа $Re = 2320$ і межовим значенням числа $Re = 13800$ при переході від турбулентного не стійкого руху до турбулентного стійкого:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu},$$

Отримані результати вимірів і розрахунків заносять в табл.5.1.

Таблиця 5.1

Результати вимірів і розрахункові дані

№ п/п	Об'єм води V , м ³	Час дослід T , с	Витрати Q , м ³ /с	Діаметр труби d , м	Площа перерізу F , м ²	Швидкість течії v , м/с	Температура t , °С	В'язкість ν , м ² /с	Re	Режим руху
1.										
2.										

Таблиця 5.2

Кінематичний коефіцієнт в'язкості води в залежності від температури

$t, ^\circ\text{C}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$
8	1,39	15	1,141	21	0,981
10	1,31	16	1,111	22	0,962
11	1,27	17	1,09	23	0,942
12	1,24	18	1,061	24	0,912
13	1,20	19	1,04	25	0,896
14	1,171	20	1,01	26	0,877

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Від яких фізичних величин, що характеризують потік, залежить режим руху рідини?
2. У чому полягає різниця між ламінарним і турбулентним режимами руху?
3. Охарактеризуйте епюри швидкості ламінарного та турбулентного рухів.
4. Якими значеннями чисел Рейнольдса характеризуються ламінарний і турбулентний рухи?
5. Критерій Рейнольдса, його фізичний зміст.
6. Гідравлічний радіус, його фізичний зміст.
7. Приведений діаметр, його фізичний зміст.
8. Порядок проведення досліджень на установці.
9. Порядок визначення витрат ваговим методом, середньої швидкості потоку рідини.

Лабораторна
робота
№
6

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ОПОРУ ТЕРТЯ ТА ЕКВІВАЛЕНТНОЇ ШОРСТКОСТІ

Мета роботи – визначити коефіцієнт опору тертя λ дослідним і розрахунковим шляхом з подальшим їх зіставленням, а також знайти відповідну еквівалентну шорсткість дослідної труби Δ_e .

6.1. Основні теоретичні положення

При русі рідини по трубопроводу витрачається енергія на подолання сил внутрішнього тертя або на тертя рідини по стінках труби. Ці втрати енергії (втрати напору) розраховуються за формулою Дарсі-Вейсбаха

$$h_t = \lambda \frac{\ell}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (6.1)$$

де λ – коефіцієнт опору тертя; ℓ – довжина труби; d – діаметр труби; v – середня швидкість рідини.

Вірогідність розрахунку цих втрат напору залежить від правильного визначення коефіцієнта опору тертя λ , який визначається експериментально з формули (6.1), або за емпіричними формулами.

У першому випадку:

$$\lambda = \frac{h_t \cdot d \cdot 2g}{\ell v^2} \quad (6.2)$$

Тут на експериментальній установці визначаються втрати напору за довжиною h_t і середня швидкість руху рідини v . Як це робиться, буде описано далі.

У другому випадку визначити коефіцієнт λ дещо важче, тому що він є складною функцією і залежить від властивостей рідини і параметрів труби:

$$\lambda = f(\text{Re}, \bar{\Delta}). \quad (6.3)$$

де $\bar{\Delta}$ – відносна шорсткість труби, яка дорівнює відношенню абсолютної шорсткості до діаметра труби ($\bar{\Delta} = \frac{\Delta}{d}$).

Якщо при ламінарному русі доведена аналітично і підтверджена експериментом залежність

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}} \quad (6.4)$$

є єдиною, то при турбулентному русі через складність у потоці явищ розрахункові формули можна отримати, лише прийнявши певні гіпотези і перевірюючи потім визначені результати експериментом.

Структура турбулентного потоку в живому перерізі неоднорідна і має вигляд, як показано на рис. 6.1. Вона складається з ядра потоку 3, в'язкого підшару 1 і перехідної області 2, розміщеної між ними.

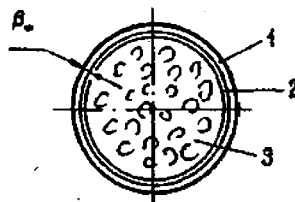


Рис.6.1. Структура турбулентного потоку

У ядрі потоку за рахунок інтенсивного перемішування градієнт швидкості має мале значення і рідина рухається із швидкостями, близькими до середньої. У в'язкому підшарі градієнти швидкості великі, закон розподілу швидкостей подібний до закону розподілу швидкостей при ламінарному русі.

У перехідній області сили в'язкого тертя різко переходять у сили інерції.

Якщо при ламінарному русі $\lambda = f(Re)$, то при турбулентному русі коефіцієнт тертя λ може залежати від числа $Re \Rightarrow \lambda = f(Re)$, від числа Re і відносної шорсткості $\bar{\Delta} \Rightarrow \lambda = f(Re, \bar{\Delta})$ і лише від відносної шорсткості $\bar{\Delta} \Rightarrow \lambda = f(\bar{\Delta})$.

Розглянемо ці випадки. Уявімо собі стінку труби, що має якусь абсолютну шорсткість Δ (рис. 6.2), яка перебуває в безпосередньому контакті з в'язким підшаром β_w . З підвищенням швидкості товщина в'язкого підшару зменшується згідно з формулою

$$\beta_w = 32,8 \frac{d}{Re \sqrt{\lambda}}. \quad (6.5)$$

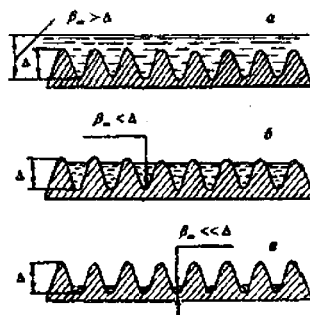


Рис.6.2. Гідравлічна шорсткість труб

1-й випадок. При відносно невеликих числах Re , коли $\beta_w > \Delta$ (рис.6.2,а), збурення, які виникають при обтіканні рідиною виступів шорсткості Δ , швидко загасають і практично не впливають на коефіцієнт тертя λ . Ця зона турбулентної течії називається "зоною гідравлічно гладких труб", у якій λ є функцією лише числа $Re \Rightarrow \lambda = f(Re)$. Для визначення λ у цій зоні використовуються такі формули:

Х. Блазіуса при $Re < 10^5$

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} \quad (6.6)$$

П.К. Конакова без обмеження числа Re

$$\lambda = \frac{1}{(1,8 \cdot \lg Re - 1,5)^2} \quad (6.7)$$

2-й випадок. При збільшенні числа Re товщина в'язкого підшару зменшується (рис.6.2,б) і частина виступів Δ потрапляє в головний потік ($\beta_w < \Delta$). У цьому випадку труба буде шорсткою в доквадратичній зоні опору, а $\lambda = f(Re; \bar{\Delta})$.

Для визначення λ у цій зоні опору використовуються такі формули:

А.Д.Альтшуля

$$\lambda = 0,11 \left(\bar{\Delta} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25} \quad (6.8)$$

Н.З.Френкеля

$$\lambda = \frac{\left(1 - \frac{8,06 \cdot d}{\Delta \cdot Re} \right)^2}{\left(2 \lg \frac{3,7 \cdot d}{\Delta} \right)^2} \quad (6.9)$$

3-й випадок. При великих числах Re , коли в'язким підшаром β_w можна знехтувати порівняно з абсолютною шорсткістю $\beta_w \ll \Delta$ (рис. 6.2,в), труба буде шорсткою, а коефіцієнт опору λ залежатиме лише від відносної шорсткості $\bar{\Delta} \Rightarrow \lambda = f(\bar{\Delta})$. Зона опору буде квадратичною.

У цій зоні застосовуються такі формули:

Б.Л.Шифринсона

$$\lambda = 0,11 (\bar{\Delta})^{0,25} \quad (6.10)$$

І.Нікурадзе

$$\lambda = \frac{1}{\left(1,74 + 2 \lg \frac{r}{\Delta} \right)^2} \quad (6.11)$$

Усі описані раніше області як турбулентного, так і ламінарного руху рідини відображено на графіках І.Нікурадзе (рис.6.3), де І – ламінарний рух; II

— гідравлічно гладкі труби; III — перехідна (доквадратична) зона; IV — шорсткі труби (квадратична зона).

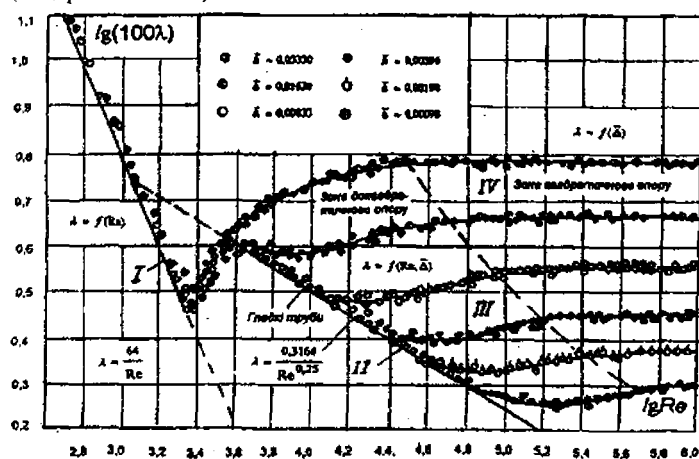


Рис.6.3. Графік Нікурадзе

6.2. Будова і принцип дії лабораторної установки

Установка складається (рис.6.4) з великої посудини I (посудина Маріотта), до якої підключено дослідну трубу 2 де на відстані l , на початку і в кінці труби, підключено п'єзометри 3 і 4. Для вимірювання витрат рідини, на вагах 7 встановлено збірник 6. Витрати рідини регулюються вентилем 5.

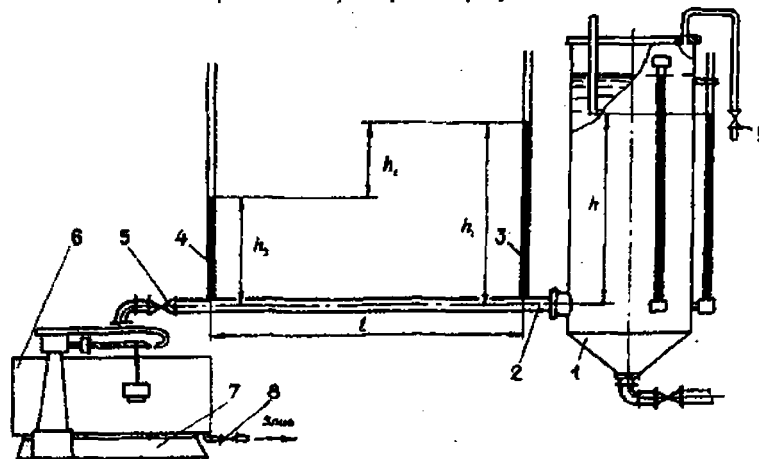


Рис.6.4. Схема лабораторної установки.

6.3. Методика проведення роботи

1. Відкриваємо повітряний хідник 9, заповнюємо посудину Маріотта 1 водою після чого закриваємо повітряний хідник 9. Відкриваємо вентиль 5 встановлюємо довільну швидкість рідини в трубі 2. При цьому рідина виливається в каналізацію через вентиль 8.

2. Коли починає працювати посудина Маріотта 1, закриваємо вентиль 8 і таруємо збірник 6 з водою на вагах 7. Коли збірник з водою відтарований, включаємо секундомір і на важіль ваг встановлюємо гирю вагою 50 або 100 кгс.

3. Кожні 30 с, за сигналом, поки збірник 6 заповнюється заданою кількістю води, записуємо покази п'єзометрів 3 і 4.

4. Коли збірник 6 заповниться заданою кількістю води, секундомір зупиняємо, відкриваємо вентиль 9 і закриваємо вентиль 5. Вимірюємо температуру води в збірнику 6.

5. Виливаємо воду із збірника 6, відкривши вентиль 8.

6. Добираємо воду в посудину 1. Збільшуємо витрати води в трубі 2 вентилем 5 і дослід повторюємо відповідно до пп. 2...5.

6.4. Методика опрацювання дослідних даних

1. Визначаємо витрати води в трубі 2, м³/с:

$$Q = \frac{V}{T},$$

де V – об'єм води, м³; $V = \frac{G}{\gamma}$; T – тривалість дослід, с; G – вага набраної в збірник 6 води, кгс; γ – питома вага води, кгс/м³ при виміряній температурі.

2. Визначаємо середню швидкість руху води в трубі, м/с:

$$v = \frac{Q}{F},$$

де F – площа живого перерізу потоку в трубі (або площа перерізу труби).

3. Знаходимо втрати напору за різницею середніх значень показів п'єзометрів 3 і 4, м вод. ст.: $h_t = h_3 - h_4$.

4. Розраховуємо значення коефіцієнта опору тертя за формулою:

$$\lambda = \frac{h_t \cdot d \cdot 2g}{l \cdot v^2}$$

5. За виміряною температурою води у таблиці 2 до лабораторної роботи №5 відшукуємо кінематичний коефіцієнт в'язкості води ν , м²/с, і підраховуємо число Re:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}.$$

6. За графіком Кольбука (рис.6.5) для визначених λ і Re знаходимо зону гідравлічного опору і відносну шорсткість труби $\bar{\Delta}$. Визначаємо еквівалентну шорсткість: $\Delta_e = \bar{\Delta} \cdot d$ мм. Для даної зони опору вибираємо відповідну емпіричну формулу і розраховуємо λ_p .

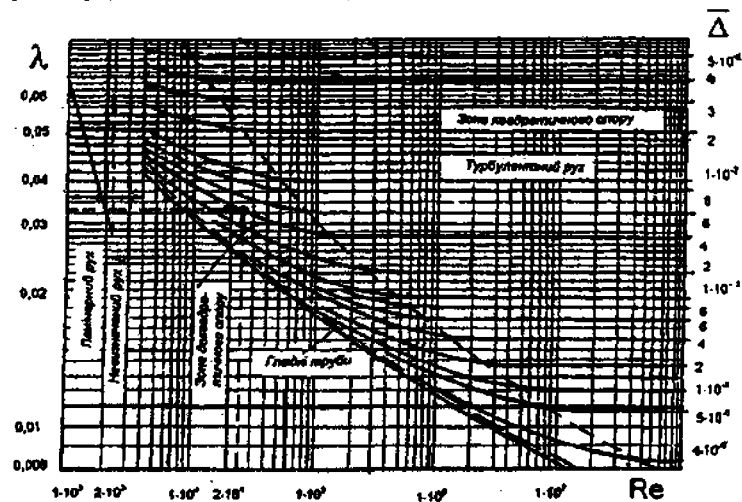


Рис. 6.5. Графік Кольбука

На рис.6.5 при $Re = 2,5 \cdot 10^4$ і $\lambda = 0,033$ зона гідравлічного опору доквадратична; відносна шорсткість $\bar{\Delta} = 4 \cdot 10^{-3}$. Для визначення λ_p у цій зоні можна скористатися формулою А.Д. Альтшуля (6.8).

7. Результати вимірів і розрахункові дані зводимо в табл. 6.1.

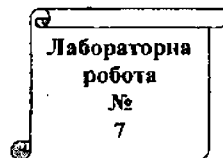
Таблиця 6.1

Результати вимірів і розрахункові дані										
№ п/п	Діа- метр d , м	Дов- жина ℓ , м	Об'єм V , м ³	Час T , с	Площа F , м ²	Вит- рати Q , м ³ /с	Швид- кість v , м/с	Покази п'єзометрів, м		
								h_3	h_1	h_2
1										
2										

Продовження таблиці 6.						
Дослідний коефіцієнт тертя λ_0	Темпера- тура води t , °C	Кінемати- чна вяз- кість ν , м ² /с	Re	Шорсткість		Розрахунковий коефіцієнт тертя λ_p
				$\overline{\Delta}$	Δ_e , мм	

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Особливості турбулентного руху рідини в трубах. Структура потоку в перерізі.
2. Що таке "гідравлічно гладкі" і "шорсткі" труби?
3. Які зони гідравлічного опору існують? Показати їх на кривих Нікурадзе і Кольбрука. Чим вони відрізняються?
4. Чи може одна і та сама труба бути гладкою і шорсткою?
5. Як визначити формулу для розрахунку λ_r для відповідної зони опору?



ДОСЛІДНЕ ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ МІСЦЕВИХ ОПОРІВ

Мета роботи - навчитися визначати
коефіцієнти місцевих опорів дослідним шляхом.

7.1. Основні теоретичні положення

При гідравлічних розрахунках трубопроводів, крім гідравлічних опорів за довжиною трубопроводів, необхідно враховувати місцеві опори на шляху потоку. Всяка зміна конфігурації потоку викликає гідравлічний опір, який супроводжується зміною швидкості потоку, відривом його від стінки і виникненням вихрових зон. Тобто втрати енергії, які виникають в місцевих опорах, викликають рівні їм місцеві втрати напору. Останні складаються з втрат на тертя і вихрування.

Втрати напору, викликані гальмуванням потоку стінками каналу, призводять до нерівномірного розподілу швидкостей в живому перерізі потоку.

Вихрові втрати, пов'язані з відривом потоку від стінок, викликані різкою зміною форми потоку. Вихрування, яке при цьому виникає, викликає значне збільшення нерівномірності швидкостей і дотичних напруг, що приводить до значного збільшення місцевих втрат напору.

Таким чином, будь-яке обладнання, що стоїть на шляху руху рідини через яке вона проходить і губить при цьому частину енергії (напору), називається місцевим опором. Місцеві опори, що зустрічаються в інженерній практиці являють собою: раптове розширення, раптове звуження і поворот потоку на певний кут.

При раптовому розширенні трубопроводу (рис.7.1,а) потік за інерцією відривається від внутрішньої кутової кромки, утворюючи струмінь який відокремлений від зони вихрування, де поступальний рух рідини відсутній. Захоплюючи частки вихрової зони, основний потік зменшує швидкість і, поступово розширюючись, знов заповнює весь переріз трубопроводу. Підвищення тиску при цьому викликає зворотний рух часток вихрової зони біля стінок, тому що ці частинки не мають тієї кінетичної енергії, яка необхідна для переміщення разом з основним потоком в зону підвищеного тиску. Внаслідок цього виникає обертовий рух часток рідини, які знаходяться в зоні вихрування, який підтримується безперервним обміном між цією зоною і основним потоком.

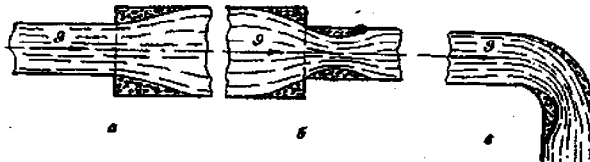


Рис.7.1. Місцеві опори: а – раптове розширення; б – раптове звуження; в – поворот потоку на певний кут

Подолання місцевого опору під час раптового звуження потоку (рис.7.1,б) супроводжується створенням у місці звуження зони вихрування, внаслідок чого зменшується переріз струменя до розмірів менших, ніж переріз вужчої труби. Пройшовши ділянку звуження, струмінь розширюється до розмірів внутрішнього діаметра трубопроводу. Але до того як потрапити в трубу з меншим діаметром, струмінь стискується до розмірів внутрішньої кутової кромки, а в зовнішній кутовій області виникає зона вихрування. Таким чином, величина втрат складається з втрат на стискання і розширення потоку.

Під час руху рідини в зігнутих трубах, каналах (рис.7.1,в) виникає нерівномірність швидкостей у перерізі потоку, що веде до збільшення втрат на тертя між шарами рідини і сприяє відриву потоку від стінок каналу і вихроутворення. При цьому втрати тим більші, чим більший кут зміни напрямку потоку. Вихрова зона на зовнішній стінці невелика і вихрування на ній постійні в часі, внаслідок чого втрати в цій зоні незначні. Інша картина спостерігається на внутрішній стінці. Тут зона вихрування значно більша і характеризується нестабільністю, що викликає значне збільшення втрат в більш зігнутих каналах.

Втрати енергії на місцевих опорах прийнято виражати в долях швидкісного напору (питомої кінетичної енергії) за формулою Вейсбаха:

$$h_r = \zeta \frac{v^2}{2g}, \quad (7.1)$$

де ζ – коефіцієнт місцевого опору; v – середня швидкість потоку в перерізі за місцевим опором.

У зв'язку із складністю картини течії реальної рідини коефіцієнт місцевого опору, як правило, визначається дослідним шляхом. Значення цих коефіцієнтів для різних місцевих опорів отримані для квадратичної області і дані про них подаються в довідниках.

Якщо під час турбулентного руху втрати енергії на місцевих опорах пов'язані з дією сил інерції, то при ламінарному русі втрати енергії на цих опорах визначаються дією сил в'язкості, і коефіцієнт місцевих опорів ζ_0 визначається залежністю:

$$\zeta_0 = \frac{A}{Re}, \quad (7.2)$$

де A – безрозмірна стала величина, яка характеризує тип (геометричні обриси) місцевого опору і визначається дослідним шляхом.

У перехідній області течії закономірності ускладнюються внаслідок сумісної дії сил в'язкості та інерції. Для цієї області відсутні надійні теоретичні методи розрахунку коефіцієнтів місцевих опорів, і їх значення обчислюються за наближеним методом, запропонованим А.Д.Альтшулем, відповідно до якого

$$\zeta = \frac{A}{Re} + \zeta_{\kappa\kappa} = \zeta_0 + \zeta_{\kappa\kappa}, \quad (7.3)$$

де $\zeta_{\kappa\kappa}$ – коефіцієнт місцевого опору, визначений в квадратичній зоні гідравлічних опорів.

Якщо місцеві опори розташовано близько один від одного (менше $20d$), то на прямих ділянках трубопроводів не відбувається стабілізація потоку і необхідно враховувати взаємодію місцевих опорів. Для турбулентного режиму руху відстань, на якій відбувається стабілізація потоку, вибирається з умови:

$$\ell_{\text{стаб}} = (20 \dots 40)d,$$

де d – внутрішній діаметр трубопроводу.

7.2. Конструкція і принцип дії лабораторної установки

Конструкція лабораторної установки для визначення коефіцієнтів місцевих гідравлічних опорів показана на рис.7.2. Вона включає в себе посудину Маріотта 1 з присланим до неї трубопроводом постійного діаметра 2, у кінці якого знаходиться вентиль 10 для регулювання витрат води, яка потрапляє із посудини Маріотта в трубовід. На шляху рідини розташовані два місцевих опори: вентиль 4 і коліно 8 з поворотом рідини на кут 90° . Для визначення втрат напору біля кожного місцевого опору на відстанях ℓ_1 і ℓ_2 встановлено п'єзометри (3, 5, 7, 9). Втрати напору за довжиною $\ell = \ell_1 + \ell_2$ фіксуються п'єзометрами 5 і 6. Кількість рідини, яка проходить із посудини Маріотта 1 через трубовід 2 і потрапляє в посудину 11, зважується на вагах 12.

Принцип дії лабораторної установки ґрунтується на її конструктивних особливостях. При відкритті вентиля 10 із посудини Маріотта 1 почне витікати рідина через трубовід 2, в якому встановиться середня швидкість течії води, що відповідає певним витратам. На протязі досліду вода потрапляє в посудину 11, досягаючи певної заданої ваги. Для визначення режиму руху рідини, за допомогою термометра визначасмо її температуру, від якої залежить в'язкість, що входить у критерій Рейнольдса (див. лабораторну роботу №5).

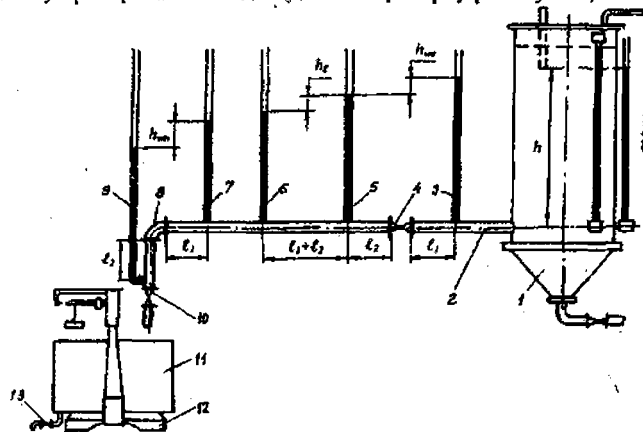


Рис. 7.2. Схема лабораторної установки

7.3. Методика проведення роботи

1. Готуємо посудину Маріотта до роботи (набираємо воду, закриваємо

повітряний хідник).

2. Відкриваємо вентиль 10 на трубопроводі 2 і встановлюємо в ньому довільну середню швидкість течії води.

3. Закриваємо зливний вентиль 13 в посудині 11, в яку потрапляє вода.

4. Таруємо посудину 11 з водою на вагах 12 і включаємо секундомір.

5. На важіль ваг кладемо гиру 50 чи 100 кгс.

6. Рівні рідини в п'єзометрах 3, 5, 6, 7, 9 фіксуємо за сигналом кожні 30 с.

7. Момент наповнення посудини заданою кількістю води фіксуємо зупинкою секундоміра.

8. Закриваємо вентиль 10, відкриваємо зливний вентиль 13 і повітряний хідник на посудині Маріотта.

7.4. Методика опрацювання дослідних даних

1. Розраховуємо витрати води:

$$Q = \frac{V}{T},$$

де V – об'єм рідини, який потрапляє в мірну посудину протягом часу досліду T .

2. Знаходимо значення середньої швидкості руху рідини:

$$v = \frac{Q}{F},$$

де F – площа живого перерізу потоку рідини в трубі.

3. Визначаємо середні значення показників п'єзометрів 3, 5, 6, 7, 9:

$$h_{3,5,6,7,9} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} h_i}{n},$$

де h_i – поточне значення показників п'єзометрів; n – кількість вимірів.

4. Визначаємо втрати напору на кожному місцевому опорі з урахуванням втрат за довжиною:

$$h_{w, \text{оч}} = h_5 - h_3; \quad h_{w, \text{дод}} = h_7 - h_5,$$

де h_w – загальні втрати напору.

5. Розраховуємо втрати напору за довжиною ($\ell = \ell_1 + \ell_2$):

$$h_\ell = h_5 - h_6.$$

6. Визначаємо дійсні значення втрат напору на місцевому опорі:

$$h_{\text{оч}} = h_{w, \text{оч}} - h_\ell; \quad h_{\text{дод}} = h_{w, \text{дод}} - h_\ell.$$

7. Розраховуємо для кожного досліду значення коефіцієнтів місцевих опорів, виходячи з формули Вейсбаха,

$$\zeta_{\text{оч}} = \frac{2gh_{\text{оч}}}{v^2}; \quad \zeta_{\text{дод}} = \frac{2gh_{\text{дод}}}{v^2}.$$

8. Отримані результати вимірів і розрахунків заносять в табл. 7.1.

Таблиця 7.1

Результати вимірів і розрахункові дані

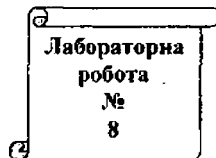
№ п/п	Діаметр d , м	Площа F , м ²	Об'єм води V , м ³	Час T , с	Витрати Q , м ³ /с	Швидкість v , м/с	Покази п'єзометрів, м				
							h_3	h_5	h_6	h_7	h_9
1											
2											

Продовження табл. 7.1

Втрати напору h_t , м	Вентиль			Коліно		
	$h_{w.}$ м	$h_{\text{вент.}}$ м	$\zeta_{\text{вент.}}$	$h_{w.}$ м	$h_{\text{кол.}}$ м	$\zeta_{\text{кол.}}$

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Від чого залежать втрати енергії на місцевому опорі?
2. Найпростіші місцеві опори.
3. Втрати енергії при раптовому розширенні потоку.
4. Втрати енергії при раптовому звуженні потоку.
5. Втрати енергії в зігнутих каналах (колінах, зміювиках та ін.).
6. Втрати напору на місцевому опорі в доквадратичній, квадратичній і перехідній областях.
7. Стабілізаційна довжина трубопроводу і її вплив на загальне значення коефіцієнтів місцевих втрат.
8. Конструкція і принцип дії лабораторної установки.
9. Порядок проведення дослідів і опрацювання дослідних даних.



ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ВИТІКАННЯ РІДИНИ ЧЕРЕЗ ОТВОРИ І НАСАДКИ

Мета роботи – дослідним шляхом визначити коефіцієнти стиснення ϵ , витрат рідини μ , швидкості φ і опору отвору ζ при витіканні рідини через отвір у тонкій стінці і зовнішній циліндричний насадок.

8.1. Основні теоретичні положення

Для здійснення необхідних витрат рідини застосовуються отвори і насадки. Витікання рідини із отворів може відбуватися при постійному чи змінному тиску в атмосферу або під рівень рідини (незатоплений або затоплений отвір).

Отвори за їх відносним розміром поділяють на малі й великі, за відносною товщиною стінки – на отвори в тонкій і товстій стінках.

Малим вважається такий отвір, у якому можна знехтувати зміною тиску за висотою отвору, а його вертикальний розмір $z = d < 0,1h$.

Великим вважається отвір, розмір живого перерізу якого по вертикалі $z = d > 0,1h$, де h – напір над центром тяжіння отвору.

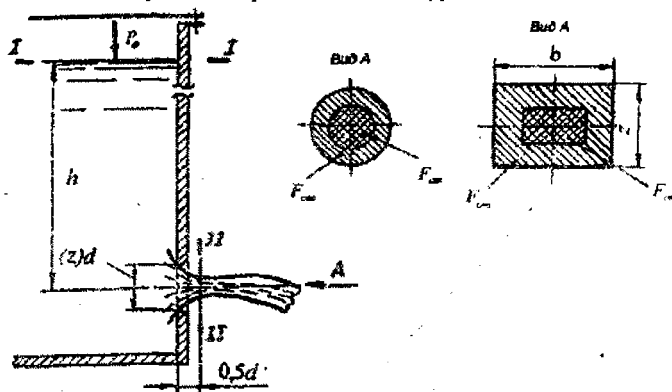


Рис.8.1. Витікання рідини через отвір у тонкій стінці

Отвір у тонкій стінці – це отвір, який має гостру кромку, а товщина стінки не впливає на форму струменя та умови витікання. Товщина тонкої стінки не перевищує $3d$ (рис.8.1).

При витіканні рідини через отвір в тонкій стінці рідина вільно витікає з отвору і конфігурація струменя змінюється плавно. Найбільше стиснення струменя відбувається на відстані $0,5d$ від отвору, де лінії течії можна вважати

майже паралельними. Стиснення струменя характеризується коефіцієнтом стиснення

$$\varepsilon = \frac{F_{cm}}{F_{om}} = \frac{d_{cm}^2}{d_{om}^2}, \quad (8.1)$$

де F_{cm} і F_{om} – відповідно площі перерізів стислого струменя та отвору. Площа поперечного перерізу стислого струменя $F_{cm} = \varepsilon F_{om}$.

Витрати рідини в загальному випадку визначаються за рівнянням:

$$Q = v \cdot F,$$

де F і v – відповідно площа перерізу струменя і швидкість руху рідини в цьому перерізі.

За допомогою рівняння Бернуллі можна отримати формулу як для дійсної, так і для теоретичної швидкості витікання рідини з отвору. Запишемо рівняння Бернуллі для вільної поверхні I-I і перерізу II-II (рис. 8.1):

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + h_r, \quad (8.2)$$

Виконаємо аналіз кожного члена рівняння відносно площини порівняння, яка проведена через центр тяжіння перерізу II-II, який майже співпадає з центром отвору.

$$z_1 = h; p_1 = p_0; v_1 = 0; z_2 = 0; p_2 = p_{om}; v_2 = v_{cm}; h_r = \zeta_{om} \frac{v_{cm}^2}{2g}$$

де ζ_{om} – коефіцієнт опору отвору.

Підставляємо отримані величини в рівняння (8.2)

$$h + \frac{p_0}{\rho g} = \frac{p_{om}}{\rho g} + \frac{v_{cm}^2}{2g} + \zeta_{om} \frac{v_{cm}^2}{2g} \quad (8.3)$$

звідки

$$v_{cm} = \sqrt{2g\left(h + \frac{p_0 - p_{om}}{\rho g}\right)} \cdot \sqrt{\frac{1}{1 + \zeta_{om}}}, \quad (8.4)$$

де $\sqrt{\frac{1}{1 + \zeta_{om}}} = \varphi$ – коефіцієнт швидкості.

Тоді

$$v_{cm} = \varphi \sqrt{2g\left(h + \frac{p_0 - p_{om}}{\rho g}\right)} \quad (8.5)$$

При $p_0 = p_{om}$

$$v_{cm} = \varphi \sqrt{2gh}, \text{ або } v_{cm} = \varphi v_m, \quad (8.6)$$

де h – напір над центром тяжіння отвору; v_m – теоретична швидкість.

Витрати рідини через малий отвір у тонкій стінці визначаємо за рівнянням

$$Q = v_{cm} \cdot F_{cm} = \varphi \sqrt{2gh} \cdot \varepsilon \cdot F_{cm}.$$

Добуток коефіцієнтів швидкості й стиснення називається коефіцієнтом витрат

$$\mu = \varphi \cdot \varepsilon. \quad (8.7)$$

Остаточно дійсні витрати рідини при постійному напорі визначаються за рівнянням

$$Q = \mu \cdot F_{cm} \sqrt{2gh}. \quad (8.8)$$

З цього виразу випливає, що коефіцієнт витрат дорівнює відношенню дійсних витрат до теоретичних:

$$\mu = \frac{Q}{Q_T}.$$

Коефіцієнт опору отвору

$$\zeta_{от} = \frac{1}{\varphi^2} - 1. \quad (8.9)$$

Якщо до тонкої стінки приладнати короткий патрубок довжиною $l = (3...7) d_{от}$, то характер явищ, що спостерігається при витіканні, суттєво змінюється. Такі короткі патрубки називаються насадками.

При витіканні рідини із зовнішнього циліндричного насадка (рис. 8.2) струмінь при вході в насадок спочатку стискується ($d_{cm} \approx 0,8d$) потім поступово розширюється і заповнює весь поперечний переріз насадка. Струмінь стискується лише всередині насадка. На виході насадки працюють повним перерізом.

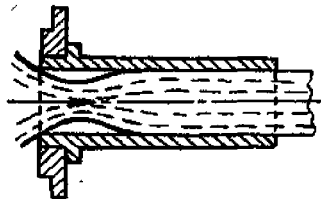


Рис. 8.2. Витікання рідини через зовнішній циліндричний насадок.

У цьому випадку коефіцієнт швидкості φ дорівнює коефіцієнту витрат μ у зв'язку з тим, що стиснення струменя на виході з насадка відсутнє ($\varepsilon = 1$).

Усередині насадка в місці стиснення струменя створюється кільцевий "мертвий" простір, повітря з якого виноситься потоком, внаслідок чого в цій зоні створюється вакуум, величина якого залежить від швидкості руху або напору. Малий тиск у стисненому перерізі зумовлює додаткове підсмоктування рідини і, як наслідок, збільшення її витрат. Вакуум в насадку дорівнює

$$\frac{p_{вак}}{\rho g} = 0,75h.$$

8.2. Будова і принцип дії лабораторної установки

Дослідна установка для визначення коефіцієнтів витікання (рис. 8.3) складається з посудини Маріотта 1, на боковій стінці якої знаходиться гніздо 2, де встановлена і закріплена пластина з отвором і насадком 3. Вода, яка витікає з отвору чи насадка потрапляє в резервуар 5, встановлений на вагах 7 під постійним напором h , який фіксується п'єзометром 8.

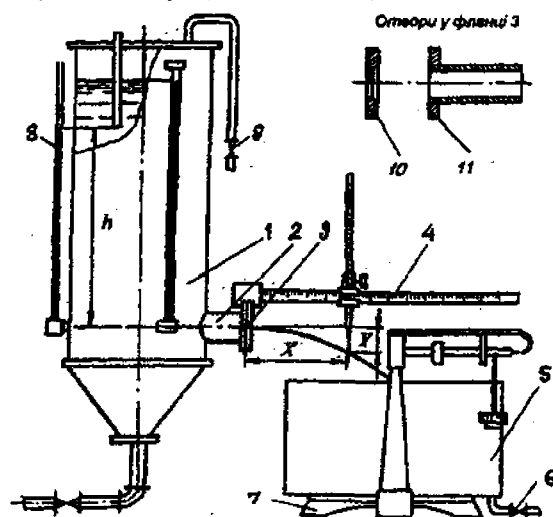


Рис. 8.3. Схема дослідної установки

Для пуску установки відкривають повітряний хідник посудини Маріотта 9, і водяний вентиль на підвідному трубопроводі, спостерігаючи за показником рівня води за водомірним склом на посудині і набирають необхідну кількість води. Після цього закривають вентилі подачі води до посудини Маріотта, і вентиль 9. Установка до проведення досліджень готова.

Коефіцієнти швидкості і витрат при витіканні рідини через малий отвір і насадок визначають на дослідній установці роздільним шляхом: перший – за допомогою координатоміра 4, другий – ваговим методом. Дійсну швидкість v_0 можна визначити із рівняння вільного падіння струменя рідини (рис.8.3):

$$x = v_0 T; \quad y = \frac{gT^2}{2},$$

де x і y координати довільної точки струменя, що визначаються шляхом заміру під час досліду.

8.3. Методика проведення роботи

1. Наповнюємо посудину Маріотта 1 водою, закриваємо повітряний хідник 9.
2. Відкриваємо отвір у тонкій стінці.
3. Після встановлення постійної швидкості витікання рідини за п'єзометром 8 визначаємо напір h , вимірюємо за допомогою штангенциркуля діаметр стисненого струменя d_{cm} .
4. Закриваємо вентиль 6 на смкості 5. Ємність 5 разом з водою, що в неї надходить, зрівноважуємо на вагах 7 за допомогою необхідної кількості гир. У момент досягнення рівноваги включаємо секундомір, після чого на чашу ваг кладемо гирі 50 або 100 кгс залежно від кількості води, яку потрібно пропустити через отвір. У момент наступної рівноваги секундомір зупиняємо. Під час досліду координатоміром 4 вимірюємо координати довільної точки струменя x і y .
5. Відкриваємо отвір із зовнішнім циліндричним насадком і дослід повторюємо за пунктами 1-4.

8.4. Методика опрацювання дослідних даних

1. Визначаємо об'єм води, що потрапив в посудину на вагах, за час досліду

$$V = \frac{G}{\gamma},$$

де V – об'єм рідини, яка пройшла через отвір в тонкій стінці, м³; G – вага рідини, кгс; γ – питома вага рідини, кгс/м³.

2. Знаходимо дійсні витрати води:

$$Q_d = \frac{V}{T},$$

де T – тривалість досліду.

3. Розраховуємо площу отвору F_{om} і стислої частини струменя, що витікає з малого отвору F_{cm} .

4. Отримуємо значення коефіцієнта стиснення струменя:

$$\varepsilon = \frac{F_{cm}}{F_{om}} = \frac{d_{cm}^2}{d_{om}^2},$$

де d_{om} – діаметр отвору, м; d_{cm} – діаметр стисненого струменя при виході його з отвору, м.

5. Розраховуємо дійсну швидкість витікання рідини, використовуючи покази координатоміра:

$$v_o = x \sqrt{\frac{g}{2y}}.$$

6. За п'єзометричним напором h визначаємо теоретичну швидкість витікання:

$$v_m = \sqrt{2gh}.$$

7. Розраховуємо коефіцієнт швидкості:

$$\varphi = v_o / v_m.$$

8. Визначаємо теоретичні витрати:

$$Q_m = v_m F_{om}.$$

9. Отримуємо значення коефіцієнта витрат:

$$\mu = \frac{Q_o}{Q_m}.$$

10. Розраховуємо коефіцієнт опору отвору:

$$\zeta_{om} = \frac{1}{\varphi^2} - 1$$

11. Отримані результати вимірів і розрахунків заносять в табл. 8.1.

Аналогічно проводяться розрахунки для зовнішнього циліндричного насадка. При цьому п. 3 випадає.

Таблиця 8.1

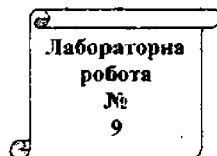
Результати вимірів і розрахункові дані

№ п/п	Величина	Одиниця виміру	Тип отвору			
1	Вага рідини G	кгс				
2	Об'єм води V	м ³				
3	Тривалість досліду T	с				
4	Дійсні витрати води Q_o	м ³ /с				
5	Площа отвору F_{om}	м ²				
6	Площа стислого перерізу F_{cm}	м ²				
7	Координати: x	м				
	y	м				
8	Дійсна швидкість v_o	м/с				
9	П'єзометричний напір h	м				
10	Теоретична швидкість v_m	м/с				
11	Теоретичні витрати Q_m	м ³ /с				
12	Коефіцієнт стиснення ε	—				
13	Коефіцієнт швидкості φ	—				
14	Коефіцієнт витрат μ	—				
15	Коефіцієнт опору ζ_{om}	—				

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що таке насадок і які бувають насадки?
2. Що значить термін "отвір в тонкій стінці"? Які вони бувають?
3. Причини стиснення струменю і коли воно буває досконалим?
4. Що характеризує коефіцієнт стиснення і як його визначають?

5. Як визначають теоретичні витрати і теоретичну швидкість?
6. Чому коефіцієнти швидкості й витрат насадка не дорівнюють одиниці?
7. Як визначити дійсні витрати і дійсну швидкість?
8. Як визначити коефіцієнт швидкості і його фізичний зміст
9. Від чого залежить коефіцієнт витрат і як його визначити?
10. Чим пояснюється збільшення витрат в насадку, коли швидкість в ньому зменшується?
11. Мета цієї роботи?



ВИПРОБОВУВАННЯ ВІДЦЕНТРОВОГО НАСОСА

Мета роботи – дослідним шляхом отримати характеристики насоса; навчитися ними користуватися при виборі насоса; визначити оптимальні умови його роботи; набути певний досвід експлуатації насосів.

9.1. Основні теоретичні положення

Відцентровий насос працює в нормальному режимі, тобто при заданій подачі Q , напорі H і частоті обертання n , коли зовнішній опір трубопроводів, який ним долається, дорівнює заданому напору. При зміні режиму роботи насоса (наприклад, зміні подачі Q) змінюються всі інші його параметри: напір H , споживана потужність N і ККД η . Залежність між цими параметрами теоретично з достатньою точністю і надійністю визначити неможливо. Тому їх отримують при безпосередньому випробовуванні насоса при сталій частоті обертання n від повністю закритої засувки на нагнітальному трубопроводі до повністю відкритої. При цьому зміна подачі здійснюється не менше 21 разу.

Графічне зображення напору H , потужності N , і ККД η від подачі Q називається характеристиками насоса (рис. 9.1), головною з яких є залежність $H = f(Q)$. Самий економічний (оптимальний) режим роботи насоса буде у випадку, коли максимальному значенню ККД відповідають певні значення напору і подачі, які називаються оптимальними. Таким чином, щоб судити про якість насосної установки, і можливості використання насоса в конкретних експлуатаційних умовах необхідно мати дані про його випробування, тобто мати його дійсні характеристики.

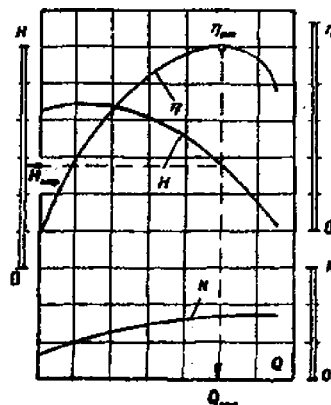


Рис. 9.1. Характеристики відцентрового насоса

При випробуванні відцентрового насоса разом з подачею вимірюють напір і споживану насосом потужність. Подачу вимірюють за допомогою витратоміра (мірна діафрагма); потужність, споживану насосом, прирівнюють до потужності, розвинутої електродвигуном з урахуванням його ККД; напір вимірюють за допомогою манометра і мановакуумметра. Повний напір створений насосом – це різниця питомих енергій на кінці нагнітального і початку всмоктувального патрубків:

$$H_n - H_s = \frac{P_n}{\rho g} - \frac{P_s}{\rho g}, \quad (9.1) \text{ де}$$

H_n і H_s – відповідно напір на нагнітальному і всмоктувальному патрубках, що вимірюється манометром і мановакуумметром.

Показники манометра і мановакуумметра можна визначити за допомогою рівняння Бернуллі, склавши його для перерізів 0-0 і I-I, II-II і III-III (рис.9.2,а).

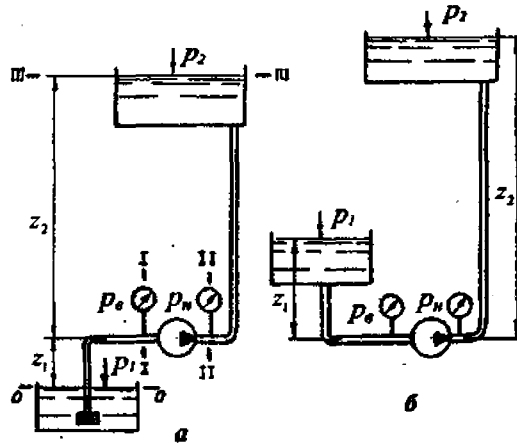


Рис.9.2. Схеми роботи відцентрових насосів: а – з нижньою посудиною; б – з верхньою посудиною

Для всмоктування (порівняльна площина 0-0):

$$\frac{P_1}{\rho g} = \frac{P_s}{\rho g} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + h'_w$$

звідки показник мановакуумметра становить:

$$\frac{P_s}{\rho g} = \frac{P_1}{\rho g} - z_1 - \frac{v_1^2}{2g} - h'_w. \quad (9.2)$$

Для нагнітання (порівняльна площина проходить через центр тяжіння живого перерізу II-II)

$$\frac{P_n}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + h''_w,$$

звідки показники манометра становитимуть:

$$\frac{P_n}{\rho g} = \frac{P_2}{\rho g} - \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_w'' \quad (9.3)$$

Підставивши рівняння (9.2) і (9.3) в (9.1), отримаємо значення повного напору створюваного відцентровим насосом при роботі на трубопровід:

$$H = z_1 + z_2 + \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + h_w' + h_w'' \quad (9.4)$$

Нехтуючи різницею швидкісних напорів у патрубках насосів, матимемо:

$$H = z_1 + z_2 + \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + h_w' + h_w'' \quad (9.5)$$

З формули (9.5) видно, що напір створюваний насосом це енергія, яка йде на переміщення рідини на висоти z_1 і z_2 ; подолання різниці тисків $\frac{P_2 - P_1}{\rho g}$ в посудинах верхній і нижній, а також на подолання гідравлічних опорів у всмоктувальному і нагнітальному трубопроводах ($h_w' + h_w''$).

Якщо схема насосної установки буде мати вигляд, показаний на рис.9.2,б, то рівняння (9.5) при роботі насоса на трубопровід набуде такого вигляду:

$$H = z_2 - z_1 + \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + h_w' + h_w'' \quad (9.6)$$

Напір створюваний самим насосом, нехтуючи різницею рівнів всмоктувального і нагнітального патрубків і втратами напору всередині насоса, становить:

$$H = \frac{P_n}{\rho g} - \frac{P_e}{\rho g} + \Delta z, \quad (9.7)$$

де Δz – висота винесення манометра над горизонтальною площиною, що проходить через центр всмоктувального патрубка (для горизонтальних насосів) і підведенням рідини безпосередньо до центру робочого колеса).

У випадку, коли вимірювання і розрахунки досліджуваних параметрів насоса виконують у системі МКГСС, то для випадку поданому на рис.9.2,а у рівнянні (9.7) замість знака “-” ставлять “+”. Це зв'язано з тим, що на створення вакууму втрачається енергія, і рівняння (9.7) в такому випадку набуває вигляду:

$$H = \frac{P_n}{\rho g} + \frac{P_e}{\rho g} + \Delta z. \quad (9.7,а)$$

Корисна потужність, яку може розвивати відцентровий насос, визначається рівнянням:

$$N_{\text{кор}} = \frac{Q \rho g H}{1000} = \frac{Q \rho H}{102},$$

а загальний ККД відцентрового насоса, який є добутком об'ємного η_v , гідравлічного η_h і механічного η_m ККД, визначається за рівнянням:

$$\eta = \frac{N_{\text{вир}}}{N_{\text{сп}}},$$

де $N_{\text{сп}}$ – потужність, споживана насосом, що визначається за допомогою ватметра з урахуванням ККД електродвигуна.

9.2. Будова і принцип дії лабораторної установки

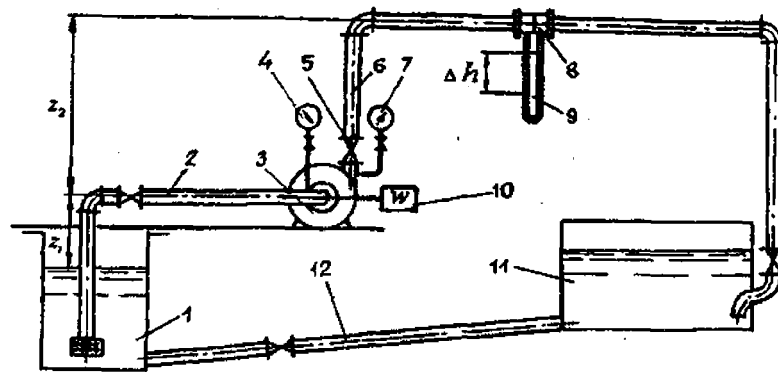


Рис.9.3. Схема лабораторної установки

Лабораторна установка (рис.9.3) складається з відцентрового насоса 3, всмоктувального 2 і нагнітального 6 трубопроводів, ємкості 1, з якої насос забирає воду і посудини 11, куди він її подає. Установка закільцьована за допомогою трубопроводу 12.

Витрати рідини вимірюються за допомогою витратомірної діафрагми 8 з присланим до неї диференціальним манометром 9. Подача Q змінюється і регулюється засувкою 5 на нагнітальному трубопроводі.

Повний напір, що створює насос, при різному відкритті засувки 5, розраховується за показниками манометра 7, який винесено від місця його врізання на висоту Δz , і мановакуумметра 4. Для вимірювання потужності електродвигуна застосовується ватметр 10. Частота обертання вала електродвигуна фіксується тахометром.

9.3. Методика проведення роботи

1. Перед пуском робочу порожнину насоса заливають водою.
2. Закривають засувку 5 на нагнітальному трубопроводі, при відкритій засувці на всмоктувальному трубопроводі, здійснюють пуск електричного двигуна.
3. Включають контрольно-вимірювальні прилади і реєструють показники мановакуумметра 4, манометра 7, ватметра 10 і диференціального манометра 9.

4. Трохи відкривають засувку 5 на нагнітальному трубопроводі і повторюють реєстрацію показів перерахованих в п. 3 приладів. Таких вимірів, згідно з правилами випробування відцентрових насосів, повинно бути не менше 21. Останній вимір виконують при повністю відкритій засувці 5.

9.4. Методика опрацювання дослідних даних

1. Подачу насоса Q визначаємо за тарувальним графіком діафрагми у залежності від показів диференціального манометра (рис.9.4).

$$Q = f(\Delta h),$$

де Δh – показник диференціального манометра.

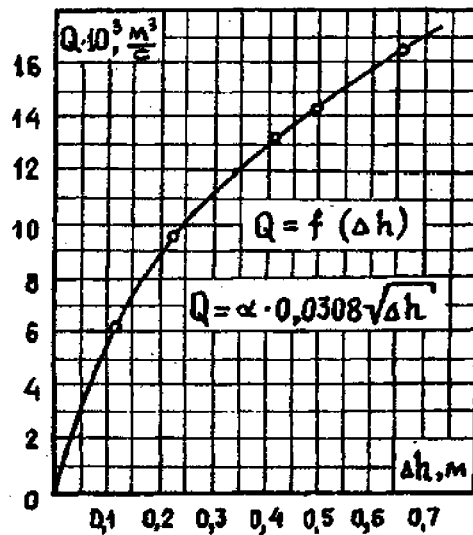


Рис. 9.4. Графік для визначення подачі насоса.

2. Реєструємо значення вакууму у всмоктувальному патрубку насоса за показами мановакуумметра і переводимо його в м вод. ст.

$$H_v = \frac{p_v}{\rho g},$$

де p_v – показники мановакуумметра. У системі МКГСС $1 \text{ ат} = 1 \text{ кгс/см}^2 = 10 \text{ м вод. ст.}$

3. За показами манометра обчислюємо напір у нагнітальному патрубку насоса:

$$H_n = \frac{p_n}{\rho g},$$

де p_n – показники манометра.

4. Визначаємо повний напір, створюваний насосом, при відомій висоті виносу манометра Δz :

$$H = H_n + H_s + \Delta z.$$

5. На підставі показів ватметра 10 знаходимо споживану потужність насоса (на валу електродвигуна):

$$N_{en} = aW,$$

де a – ціна поділки ватметра ($a = 100\text{Вт}$), яка враховує межі вимірюваних струмів і напруг; W – кількість поділок на ватметрі при вимірюванні потужності.

Для дослідної установки, де потужність визначається за допомогою одного ватметра (перекіс фаз у трьохфазній мережі незначний), отримаємо:

$$N_{en} = \frac{3Wa}{1000} \eta_{e.o} = \frac{3 \cdot 100 \cdot W}{1000} \cdot 0,87 = 0,231W,$$

де $\eta_{e.o}$ – ККД електричного двигуна ($\eta_{e.o} = 0,87$).

6. Розраховуємо значення загального ККД відцентрового насоса:

$$\eta = \frac{Q \rho g H}{1000 N_{en}} = \frac{Q \rho H}{102 N_{en}}.$$

7. Отримані результати вимірів і розрахунків заносимо в табл. 9.1.

8. На підставі даних табл. 9.1 на міліметровому папері будуємо спільну характеристику насоса (див. рис. 9.1): $H-Q$, $N-Q$, $\eta-Q$.

9. На підставі отриманого загального графіка (характеристики насоса) визначаємо оптимальні умови роботи, тобто для максимального значення загального коефіцієнта корисної дії $\eta_{\max}$ визначаємо відповідні йому значення оптимальної подачі Q_{opt} і оптимального напору H_{opt} .

Таблиця 9.1

Результати вимірів і розрахункові дані

№ п/п	Величини	Розмірність	Дослідні значення величини				
			1	2	3	...	21
1	Покази манометра, p_n	кгс/см ² Па					
2	Манометричний напір, H_n	м вод. ст.					
3	Покази мановакуумметра, p_e	кгс/см ² Па					
4	Вакуум метричний напір, H_e	м вод. ст.					
5	Висота винесення манометра, Δz	м					
6	Повний напір H	м					
7	Різниця тисків на діаграмі Δh	м рт. ст.					
8	Подача насоса $Q \cdot 10^3$	м ³ /с					
9	Показники ватметра W	поділок					

10	Споживана потужність $N_{сп}$	кВт					
11	ККД насоса η	—					
12	Частота обертання n	хв ⁻¹					
13	Максимальний ККД насоса η_{max}	—					
14	Оптимальна подача Q_{opt}	м ³ /с					
15	Оптимальний напір H_{opt}	м вод. ст.					

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Дійсні характеристики відцентрового насоса.
2. Визначення напору насосної установки при перекачуванні рідини з посудини, що знаходиться нижче насоса.
3. Визначення напору насосної установки при перекачуванні рідини з посудини, що знаходиться вище насоса.
4. Визначення подачі і корисної потужності насоса.
5. Загальний ККД насоса і його складові.
6. Будова і принцип дії дослідної установки.
7. Порядок проведення лабораторної роботи і опрацювання дослідних даних.

ЛІТЕРАТУРА

ЗАГАЛЬНА

Кулінченко В.Р. Гідравліка, гідравлічні машини і гідропривід: Підручник.– К.: Інкос, 2006. – 616 с.

ДОДАТКОВА ДО ВСІХ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

1. **Кулінченко В.Р., Мотуз І.К. Зеленюк І.Г.** Основи наукових досліджень з гідравліки та гідравлічних машин: Навчальний посібник.– К.: НМК ВО, 1993.– 248 с.

2. **Матісева В.М., Кулінченко В.Р., Яхно О.М., Мотуз І.К.** Лабораторний практикум (Гідравліка, гідравлічні машини, аеромеханіка, гідро- і пневмопривід та пневмоавтоматика): Навчальний посібник.– Чернічці: Глибока, 2007.–442 с.

3. **Мотуз І.К.** Гідравліка і гідравлічні машини в довідках і таблицях: Навчальний посібник.– К.: ІЗМН, 1996.– 280 с.

ЗМІСТ

Загальні положення.....	3
Лабораторна робота № 1. Дослідження роботи посудини Маріотта.....	4
Лабораторна робота № 2. Обертання посудини з рідиною навколо вертикальної осі.....	9
Лабораторна робота № 3. Дослідна перевірка рівняння Бернуллі.....	13
Лабораторна робота № 4. Градування витратоміра Вентурі.....	18
Лабораторна робота № 5. Визначення режимів руху рідини у потоці.....	24
Лабораторна робота № 6. Експериментальне визначення коефіцієнтів опору тертя та еквівалентної шорсткості.....	30
Лабораторна робота № 7. Дослідне визначення коефіцієнтів місцевих опорів.....	37
Лабораторна робота № 8. Експериментальне визначення коефіцієнтів витікання рідини через отвори і насадки.....	42
Лабораторна робота № 9. Випробовування відцентрового насоса.....	49
Література.....	56

Навчальне видання

**ГІДРАВЛІКА,
ГІДРАВЛІЧНІ
МАШИНИ І
ГІДРОПНЕВМОПРИВІД**

(ЧАСТИНА І. ГІДРАВЛІКА І ГІДРАВЛІЧНІ МАШИНИ)

Лабораторний практикум
до виконання лабораторних робіт студентами спеціальностей напрямів:
0902 "Інженерна механіка", 0905 "Енергетика", 0925 "Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології" денної та заочної форм навчання

Видання подається в авторській редакції

Підп. до друку 06.10.08 Ум. друк. арк. 3,56. Наклад 200 пр.
Зам 203-10/07

РВЦ НУХТ. 01033 Київ-33, вул. Володимирська, 68
www.book.nuht.edu.ua

Свідцтво про реєстрацію серія ДК № 1786 від 18.05.04 р.

СУПРОВІДНА ІНФОРМАЦІЯ ДО ПУБЛІКАЦІЇ

Гідравліка, гідравлічні машини і гідропневмопривід.
(Частина I. Гідравліка і гідравлічні машини):
Лабораторний практикум до виконання лабораторних
робіт студентами спеціальностей напрямів: 0902
«Інженерна механіка», 0905 «Енергетика» 0925
«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
денної та заочної форм навчання /

Укладачі: К.Р.Кулінченко, І.К.Мотуз.- К.: НУХТ,
2008.- 58 с.

Рецензент С.М.Василенко, д-р техн. наук

Наводяться дев'ять лабораторних робіт передбачених
робочими програмами курсу.

Ключові слова: Маріотт, обертання, Бернуллі,
Вентурі, Рейнольдс, опори, витікання, насос.

Гидравлика, гидравлические машины и
гидропневмопривод. (Часть II. Гидравлика и
гидравлические машины): Лабораторный практикум к
выполнению лабораторных работ студентами
специальностей напрямів: 0902 «Инженерная механика»,
0905 «Энергетика» 0925 «Автоматизация и компьютерно-
интегрированные технологии» дневной и заочной форм
учебы /

Составители: К.Р.Кулинченко, И.К.Мотуз.- К.:
НУХТ, 2008.- 58 с.

Рецензент С.М.Василенко, д-р техн. наук

Наводятся девять лабораторных работ
предусмотренных рабочими программами курса.

Ключевые слова: Мариотт, вращение, Бернулли,
Вентури, Рейнольдс, сопротивления, истечения, насос.

Hydraulics, hydraulic machines and
hydropneumocommunicator. (Part II. Hydraulics and hydraulic
machines): Laboratory practical work to implementation of

laboratory works the students of specialties of напрямів: 0902 «Engineering mechanics», 0905 «Energy» 0925 «Automation and computer-computer-integrated technologies» of daily and extra-mural forms of studies /

Compilers: K.R.Kulinchenko, I.K.Motuz.- K.: NUKHT, 2008.- 58 p.

Reviewer S.M.Vasilenko, dr of техн. sciences

Nine laboratory works are pointed foreseen the executable codes of course.

Keywords: Mariott, rotation, Bernulli, Venturi, Reynol'ds, resistances, profluviums, pump.