

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Одеська державна академія холоду



Альтман Е.І., Бошкова І.Л., Кузнєцов І.О.

ГІДРОГАЗОДИНАМІКА

ПОСІБНИК

ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Одеса – 2015

Альтман Е.І., Бошкова І.Л., Кузнецов І.О.

Посібник до виконання лабораторних робіт з курсу "Гідрогазодинаміка".

Одеська державна академія холоду, 2015. – 60 с.

Розроблений кафедрою тепломасообміну відповідно освітньо-професійній програмі і структурно-логічній схемі підготовки бакалаврів напрямку підготовки 050701, 050604, 050601.

Посібник розглянуто на засіданні кафедри теплоенергетики та трубопровідного транспорту енергоносіїв
Протокол № 7 від « 27 » лютого 2015 р.

Завідувач кафедри теплоенергетики та
трубопровідного транспорту енергоносіїв

О.С. Тітлов

Голова методичної комісії

О.С. Тітлов

Зміст

| | |
|---|----|
| Передмова. Загальні вказівки до виконання лабораторних робіт | 4 |
| Опис комплексного стенда для проведення лабораторних робіт з гідравліки | 5 |
| Методика роботи на стенді при проведенні експерименту | 7 |
| Лабораторна робота № 1. Випробування гідравлічного преса | 9 |
| Лабораторна робота № 2. Дослідження режимів руху рідини | 13 |
| Лабораторна робота № 3. Експериментальне визначення лінії гідродинамічного напору і п'єзометричної лінії | 20 |
| Лабораторна робота № 4. Тарування витратомірного пристрою | 24 |
| Лабораторна робота № 5. Визначення коефіцієнта опору по довжині трубопроводу | 28 |
| Лабораторна робота № 6. Визначення коефіцієнта місцевого опору | 32 |
| Лабораторна робота № 7. Визначення коефіцієнтів, що характеризують витікання рідини через отвір з гострою кромкою при постійному напорі | 36 |
| Лабораторна робота № 8. Визначення коефіцієнтів, що характеризують витікання рідини через насадок, при постійному напорі | 40 |
| Лабораторна робота № 9. Випробування відцентрового насосу | 43 |
| Лабораторна робота № 10. Дослідження пограничного шару на плоскій пластині | 49 |
| Список літератури | 60 |

ПЕРЕДМОВА

Даний посібник складений на підставі розроблених кафедрою тепломасообміну лабораторних робіт, що викладені в методичних вказівках [1,7].

ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

У гідравлічній лабораторії студент може практично спостерігати протікання різних складних гідравлічних явищ, ознайомитися з існуючими методами технічних вимірів, з'ясувати реальне значення коефіцієнтів, якими коригуються теоретичні дослідження гідравлічних явищ, вивчити конструкції гідравлічних машин (насосів), що в цілому дає можливість закріпити теоретичний матеріал лекцій і надалі застосовувати його для вирішення практичних інженерних завдань. Перед виконанням лабораторної роботи студент повинен самостійно проробити відповідні розділи курсу за підручниками і лекційним матеріалом, докладно вивчити методичний посібник з даного завдання.

У гідравлічній лабораторії перед проведенням експерименту з'ясовується ступінь підготовленості студентів до проведення даної роботи, уточнюються конструктивні особливості установки, особливості постановки експерименту й обробки отриманих даних.

Зроблені виміри й розрахунки записуються студентами в заздалегідь підготовлені протоколи, які потім пред'являються для перевірки керівникові занять. Експеримент повторюється, якщо отримані результати визнані керівником незадовільними. Протокол лабораторної роботи повинен складатися акуратно, містити схему установки, необхідні розрахункові формули й розрахунки. При проведенні експерименту й обробці результатів робіт студент користується довідковим матеріалом і дає критичну оцінку отриманим результатам. Студент повинен захистити протокол роботи з результатами дослідів та розрахунків.

ОПИС КОМПЛЕКСНОГО СТЕНДА ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ З ГІДРАВЛІКИ

В основу даного посібника покладено матеріал, який викладений в [1].

Схема комплексного стенда для виконання лабораторних робіт наведена на рис. 1. Вода з резервуара 1 по магістральній трубі 2 і відводу 3 через регулювальний вентиль 4 надходить у переливний бак 5, звідти через відкритий запірний кран 8 у напірний бак 9. Протягом експерименту рух рідини на вимірювальних ділянках повинен бути сталим, що можливо лише за умови підтримки постійного напору в напірному баку 9. Роль стабілізатора напору виконує переливний бак 5, у центрі якого встановлена конічна лійка 6. Надлишок води, що надходить із резервуара, зливається через горловину лійки в каналізацію по шлангу 7, який має прозору вставку, через яку спостерігають за потоком води й вентилем 4 регулюють постійний мінімальний перелив води. У такий спосіб рівень води в переливному баку не може піднятися вище горловини лійки, а наявність постійного переливу через шланг 7 свідкує про постійність напору. При необхідності зміни напору переливний бак 5 може бути піднятий нагору або опущений униз. Величина створюваного напору і його сталість контролюється п'єзометром 10. Температура води в напірному баку вимірюється термометром 11.

З напірного бака 9 вода може надходити на вимірювальні ділянки:

- при дослідженні режимів руху: 12,
- при дослідженні витратомірного пристрою й місцевого опору: 13,
- при дослідженні опорів по довжині: 14,
- при дослідженні витікання рідини через отвори й насадки: 15.

Вимірювальна ділянка 15 перекрита тарілчастим клапаном, відкриття якого здійснюється поворотом рукоятки 16 на 90° проти ходу годинної стрілки.

Вимірювальні ділянки 12, 13 і 14 перекриті регулювальними кранами 25. Змінюючи ступінь відкриття крана, регулюють витрату води, що збирається в прийомному баку 23, де закріплений пустотілий циліндр 24,

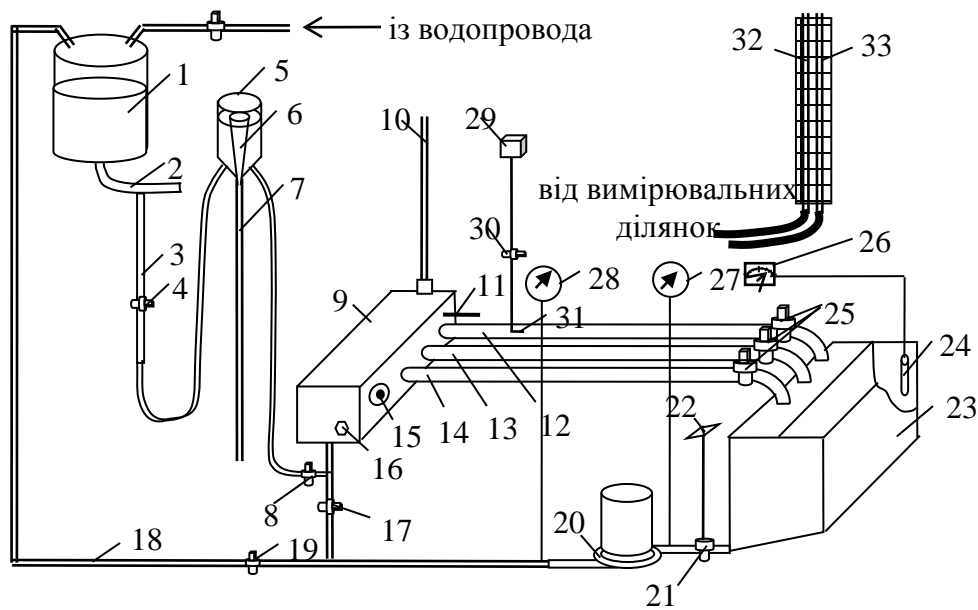


Рис.1

Схема комплексного стенду

1 – резервуар з водою, 2 – магістральна труба, 3 – відвід, 4 – регулювальний вентиль, 5 – переливний бак, 6 – конічна лійка, 7 – зливний шланг, 8 – запірний кран, 9 – напірний бак, 10 – п'єзометр, 11 – термометр, 12...15 – вимірювальні ділянки, 16 – рукоятка тарілчастого клапана, 17,19 – запірні вентиля, 18 – трубопровід зворотної води, 20 – відцентровий насос, 21 – запірний кран прийомного бака, 22 – рукоятка, 23 – прийомний бак, 24 – датчик об'єму рідини, 25 – регулюючий кран, 26 – вимірник об'єму рідини, 27 – вакуумметр, 28 – манометр, 29 – ємкість для фарби, 30 – голчастий клапан, 31 – капілярна трубка, 32,33 – п'єзометр.

відкритий знизу. По мірі наповнення баку рівень води в ньому підвищується, повітря, що перебуває в циліндрі 24, стискується й зміна тиску фіксується мікроманометром 28, шкала якого проградуєвана в одиницях виміру об'єму. Для видалення води із прийомного бака 23 поворотом рукоятки 22 на 90° відкривають запірний кран 21. При цьому автоматично включається електродвигун відцентрового насоса 20 і вода через відкритий запірний вентиль 19 по трубопроводу 18 повертається в резервуар 1.

Для дослідження режимів руху рідини на стенді встановлена ємкість 29, у якому перебуває фарба, що подається через голковий клапан 30 і капілярну трубку 31 у потік рідини.

Для виміру п'єзометричних напорів служить п'єзометр 32, що підключається на початку вимірювальної ділянки, і п'єзометр 33, що підключається в кінці вимірювальної ділянки.

МЕТОДИКА РОБОТИ НА СТЕНДІ ПРИ ПРОВЕДЕННІ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Резервуар 1 перед початком роботи повинен бути заповнений водою, рівень якої контролюється по водомірному склу.

1. Відкрити вентиль 4 і почекати, доки вода почне зливатися по шлангу 7 в каналізацію. Кран 25 встановити у положення, що забезпечує бажану витрату, і, прикриваючи вентиль 4, домогтися мінімального переливу (вода повинна стікати тонкою плівкою по стінках скляної вставки шланга 7).
2. Поворотом рукоятки 22 на 90° проти ходу годинної стрілки включити насос і відкачати воду із прийомного бака 23, при цьому стрілка мікроманометра 26 повинна прийти в крайнє ліве положення.
3. Повернути рукоятку 22 у вихідне положення й приготуватися до виміру часу витікання заданого обсягу рідини.
4. У момент, коли стрілка вимірника об'єму перетне позначку «0» на шкалі, включити секундомір.
5. У момент сполучення стрілки з оцінкою «2,5» або «5» л по шкалі приладу 26, зупинити секундомір і поворотом рукоятки 22 почати відкачування води із прийомного бака в резервуар 1
6. Зробити необхідні виміри: температури води - по термометру 11, п'єзометричних висот – по п'єзометрам 32 і 33, тиск у нагнітальному трубоп-

роводі - по манометру 28, вакуум в усмоктувальному патрубку - по вакуумметру 27, і т.д., залежно від поставленого завдання.

7. Внести значення обмірюваних величин у таблицю протоколу.
8. Для переходу на інший режим відкриттям вентиля 4 збільшити перелив. Потім, відкривши кран 28, збільшити витрату води через вимірювальну ділянку й знову вентилям 4 відрегулювати перелив так, щоб він був мінімальним.
9. Повторити всі дії, перераховані в пунктах 2 - 7.
10. Після закінчення експериментів одночасно закрити кран 25 та вентиль 4 і відкачати воду із прийомного бака в резервуар.
11. Електричну частину стенда відключити від мережі живлення.

Лабораторна робота № 1.

ВИПРОБУВАННЯ ГІДРАВЛІЧНОГО ПРЕСА

Мета

Вивчення закону Паскаля та основного рівняння гідравліки. Вивчення конструкції й принципу дії гідравлічного преса.

Завдання.

1. Виконати виміри основних геометричних параметрів пресу. Експериментально визначити манометричний тиск в рідині.
2. Визначити максимальне зусилля, що розвиває прес, і розрахувати коефіцієнт посилення преса.

Теоретичні положення.

Рідина в гідравліці розглядається як безперервне середовище, що заповнює простір без порожнеч і проміжків. Внаслідок текучості рідини (рухливості її часток) у ній не можуть діяти зосереджені сили, а можливо лише дія сил, безперервно розподілених по всьому об'єму (масі) або по поверхні. У зв'язку із цим сили, що діють на розглянуті об'єми рідини і які являються по відношенню до них зовнішніми, розділяють на масові (об'ємні) і поверхневі [2,3].

Масові сили пропорційні масі рідкого тіла або, для однорідних рідин, його об'єму. Це сила ваги й сила інерції при відносному спокою рідини.

Поверхневі сили безперервно розподілені по поверхні рідини й при рівномірному їхньому розподілі пропорційні величині цієї поверхні. Ці сили обумовлені безпосереднім впливом сусідніх об'ємів рідини на даний об'єм або ж впливом інших тіл (твердих або газоподібних), що стикаються з даним рідким тілом.

Напряга стиску, що виникає в рідині під впливом поверхневих і масових сил, називається гідростатичним тиском.

За одиницю тиску в міжнародній системі (СИ) прийнятий рівномірно розподілений тиск, при якому на площу 1 м діє сила 1 Ньютон. Ця одиниця називається Паскаль, позначення: Па.

$$1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$$

У техніці поки продовжують застосовувати позасистемну одиницю виміру тиску - технічну атмосферу (1кГ - сила, що діє на 1 см² поверхні).

$$1 \text{ техн. атм.} = 1 \text{ кГ} = 10000 \text{ кгс/м}^2 = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Па, де } 1 \text{ кГ} = 9,81 \text{ Н.}$$

Тиск у точці обсягу рідини залежить від глибини занурення цієї точки й визначається по виразу:

$$P = P_o + \rho gh, \text{ Па}$$

де P_o – напруга поверхневих сил (тиск на поверхні рідини), Па

ρgh – напруга масової сили (тиск стовпа рідини).

Так як в рідині неможлива концентрація напруг, то із цього впливає закон, відкритий Паскалем:

Зміна тиску в будь-якій точці в межах розглянутого об'єму спочиваючої рідини викликає таку ж зміну тиску у всіх інших точках цього об'єму.

У техніці широко використовуються гідравлічні машини, робота яких заснована на законі Паскаля. Однією з них є гідравлічний прес.

Устрій експериментальної установки.

Методика проведення експерименту

Схема гідравлічного преса представлена на рис.1.1. При підйомі плунжера 1 вгору в допоміжному циліндрі 7 створюється розрідження й робоча рідина, через всмоктувальний клапан 8, надходить із ємності 9 у циліндр. При русі вниз у циліндрі підвищується тиск і рідина з нього надходить через нагнітальний клапан 10 у робочий циліндр 6. Якщо до важеля 5 прикладена сила G , то тиск у циліндрі, а отже й у всій системі (без врахування тиску стовпа рідини) буде однаковим $P_1 = P_2 = P$

$$P_1 = G \frac{a}{b} \cdot \frac{1}{\omega_1}, \text{ Па}$$

де $\omega_1 = \frac{\pi d_1^2}{4}$ – площа торцевої поверхні плунжера, м².

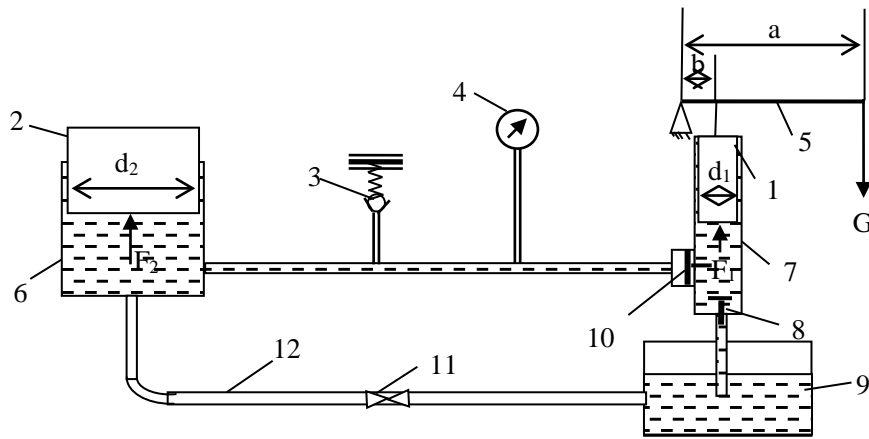


Рис. 1.1

Схема гідравлічного пресу

1- плунжер; 2- поршень; 3-запобіжний клапан; 4-манометр; 5-важіль; 6-робочий циліндр;7-допоміжний циліндр; 8-усмоктувальний клапан; 9-ємність із робочою рідиною; 10-нагнітальний клапан; 11-вентиль; 12-трубопровід повернення робочої рідини.

Сила, що діє на поршень (зусилля пресу)

$$F_2 = P \cdot \omega_2, \text{ Н}$$

ω_2 – площа торцевої поверхні поршня м^2 . Коефіцієнт посилення преса містить у собі гідравлічний і механічний коефіцієнт посилення

$$K = \frac{F_2}{G} = \frac{a}{b} \cdot \frac{\omega_2}{\omega_1};$$

де $K_m = \frac{a}{b}$ – коефіцієнт механічного посилення;

$$K_r = \frac{\omega_2}{\omega_1} \text{ – коефіцієнт гідравлічного посилення}$$

Для попередження перевантажень преса передбачено запобіжний клапан 3, навантажений пружиною 13, зусилля стиску якої регулюється гвинтом 14. При підвищенні тиску в системі до величини, при якій сила тиску рідини на запобіжний клапан стане рівної зусиллю стиску пружини, клапан 3 відкривається й рідина скидається із системи в ємність 9.

Для визначення максимального зусилля, що розвивається пресом, необхідно закрити вентиль 11 і, переміщаючи важіль 5 униз, нагнати робочу рідину в систему до моменту, коли "спрацьовує" зворотний клапан. У момент спрацьовування клапана зафіксувати показання манометра 4, відкрити вентиль 11 для спорожнювання робочого циліндра, виміряти довжини малого (b) і великого (a) плечей важеля, діаметри поршня d_2 і плунжера d_1 .

Обробка результатів експерименту

Експериментальні й розрахункові дані заносяться в таблицю.

| Найменування величин | Позначення | Розмірність | Значення величин |
|-------------------------------|------------|-------------|------------------|
| Діаметр поршня | d_2 | м | |
| Діаметр плунжера | d_1 | м | |
| Довжина великого плеча | a | м | |
| Довжина малого плеча | b | м | |
| Показання манометра | P_m | Па | |
| Зусилля, що діє на поршень | F_1 | Н | |
| Зусилля, що розвиває прес | F_2 | Н | |
| Зусилля, прикладене до важеля | G | Н | |
| Коефіцієнт посилення преса | K | – | |

Зусилля, що розвиває прес $F_2 = P \cdot \omega_2$, Н

де площа торцевої поверхні $\omega_2 = \frac{\pi d_2^2}{4}$

Зусилля, що діє на поршень $F_1 = P_m \cdot \omega_1$, Н

де площа торцевої поверхні $\omega_1 = \frac{\pi d_1^2}{4}$

Зусилля, прикладене до важеля $G = F_1 \cdot \frac{b}{a}$, Н

Коефіцієнт підсилення пресу $K = \frac{F_2}{G}$

Контрольні питання

1. Як класифікуються сили, що діють на рідину?
2. Що називається гідростатичним тиском?
3. Які властивості має тиск?
4. Що таке надлишковий і абсолютний тиск?
5. Що таке вакуум?
6. Як формулюється закон Паскаля?
7. Який принцип дії гідравлічного преса?
8. Одиниці виміру тиску?

Лабораторна робота № 2

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РУХУ РІДИНИ

Мета

Ознайомлення з класифікацією режимів руху рідини, методами визначення, в якому режимі спостерігається процес руху.

Завдання

1. Дослідити візуально, намалювати й описати характер руху струмка барвника при різних режимах руху рідини, визначити експериментально значення числа (критерію) Рейнольдса для цих режимів.

2. Побудувати графік залежності числа Рейнольдса від швидкості й визначити критичну швидкість переходу від ламінарного режиму руху до турбулентного.

Теоретичні положення

Дослідження питання про механізм руху рідини приводить до висновку про існування двох різних режимів руху. Ця обставина була відома гідравлікам ще в першій половині 19^{го} сторіччя, однак наявність двох режимів руху була підтверджена тільки в 1883 році відомим фізиком Рейнольдсом на основі простих і наочних дослідів [2].

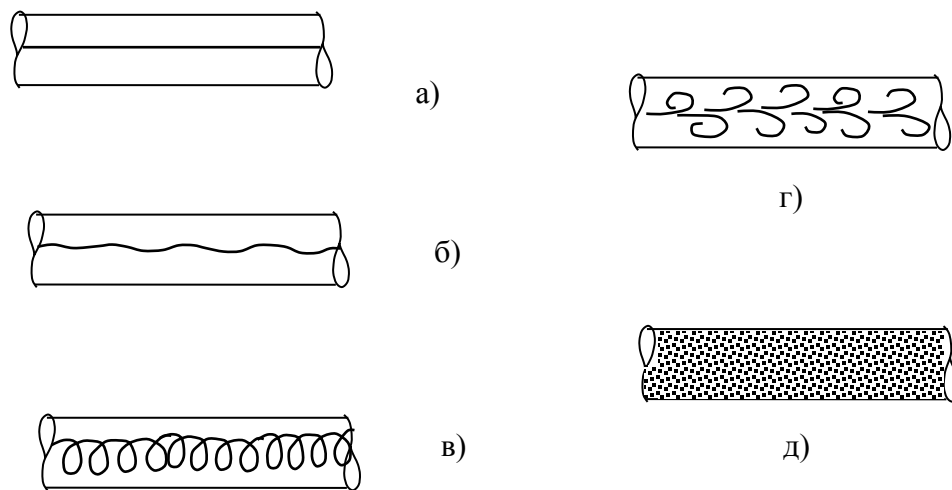


Рис. 2.1
Картини руху рідини

У потік води, що рухається по скляній трубі, подається тонка струминна барвника. Швидкість руху рідини регулюється краном, установленим на кінці труби. Поступово збільшуючи ступінь відкриття крана, можна спостерігати наступну картину: при невеликих швидкостях руху барвник рухається у вигляді чітко вираженого тонкого струмка, не змішуючись з потоком незабарвленої води (рис.2.1-а), при зростанні швидкості руху, струминна барвника починає коливатися й приймає хвилеподібні обриси (рис.2.1-б). Потім на окремих її ділянках починає з'являтися завихрення (рис.2.1-в), а при подальшому збільшенні швидкості – розриви. Струминна барвника втрачає виразну форму (рис.2.1-г) і, нарешті, при якомусь певному значенні швидкості повністю розривається, розмиваючись по всьому об'єму потоку (рис.2.1-д) і рівномірно забарвлюючи його. Якщо в цьому випадку підмішати в потік рідини дрібні тверді частки такої ж густини, як і густина рідини, то переміщення часток буде відбуватися по досить складних криволінійних траєкторіях.

При проведенні досліду у зворотному порядку, тобто при поступовому зменшенні швидкості рідини, спостережувані явища повторюються у зворотному порядку, але при інших, більш низьких значеннях швидкостей.

Рух рідини при малих швидкостях, коли шари рідини переміщуються уздовж осі потоку паралельно один одному, називають **ламіна́рним**.

Неупорядкований, вихороподібний рух часток рідини, що спостерігається при більших швидкостях, називається **турбулентним**. Цей режим характеризується появою поперечного переносу імпульсу руху.

При русі рідини по трубах і каналах виникають гідравлічні опори, на подолання яких витрачається внутрішня механічна енергія потоку. У ламінарному потоці гідравлічні опори обумовлені тільки силами в'язкісного тертя між шарами рідини. У турбулентному потоці крім витрат енергії на сили в'язкісного тертя відбуваються додаткові витрати енергії на утворення вихорів. Чим більше турбулентність, тим більше частка цих витрат. Тому при розрахунках гідравлічних систем дуже важливо заздалегідь виявити характер руху рідини, щоб правильно оцінити кількість затрачуваної енергії [2,4].

Як показали досліди, характер руху рідини залежить не тільки від середньої швидкості потоку, але й від його геометричного параметру (еквівалентного діаметра), в'язкості й густини рідини.

Рейнольдс об'єднав ці параметри в безрозмірний комплекс, чисельне значення якого дає можливість судити про режим руху рідини. Критерій (число) Рейнольдса являє собою відношення питомих сил інерції $\approx \rho V_{cp}^2$ до пи-

томих сил тертя $\approx \mu \frac{V_{cp}}{d}$

$$Re = \frac{V_{cp} \cdot d_{екв} \cdot \rho}{\mu}$$

Т.к. $\frac{\mu}{\rho} = \nu$, то $Re = \frac{V_{cp} \cdot d_{екв}}{\nu}$,

де: V_{cp} - середня швидкість потоку, м/с;

ρ - густина рідини, кг/м³;

μ - коефіцієнт динамічної в'язкості, Н·с/м²;

ν - коефіцієнт кінематичної в'язкості, м²/с;

$d_{екв}$ - еквівалентний діаметр $d_{екв} = 4R$;

Гідравлічний радіус R визначається як відношення площі живого перерізу до довжини периметра змоченої стінки для цього перерізу

$$R = \frac{\omega}{\chi}$$

ω - площа живого перерізу потоку, м²

χ - змочений периметр живого перерізу або довжина межі контакту рідини із твердою поверхнею, м

При напірному русі для труб круглого перерізу із внутрішнім діаметром $d_{\text{вн}}$ еквівалентний діаметр дорівнює:

$$d_{\text{екв}} = \frac{4 \cdot \frac{\pi \cdot d_{\text{вн}}^2}{4}}{\pi \cdot d_{\text{вн}}} = d_{\text{вн}} ;$$

Для прямокутника зі сторонами a и b : $\omega = a \cdot b$; $\chi = 2(a + b)$

$$d_{\text{екв}} = \frac{4a \cdot b}{2(a + b)} = \frac{2a \cdot b}{(a + b)}$$

Режим руху рідини впливає не тільки на гідродинамічні процеси, але й на процеси тепло- і масообміну. Так, при підвищенні ступеня турбулентності в трубах теплообмінних апаратів зменшується товщина пристінного ламінарного підшару. Термічний опір його зменшується, зростає частка молярного (конвективного) переносу тепла, що приводить до підвищення ефективності роботи апарата [3].

Встановлено, що для ламінарного режиму числова величина критерію Рейнольдса завжди менше, а для турбулентного режиму завжди більше деякого певного "критичного значення". Для прямих труб критичне значення числа Рейнольдса $Re \approx 2320$. Це значення є до деякої міри умовною величиною, тому що важко виявити різкий перехід від ламінарного режиму до турбулентного. У дійсності спостерігається так звана "перехідна" область зникнення ламінарного й установлення турбулентного стану потоку. Числові значення критерію Рейнольдса для перехідної області перебувають у межах 2320-13000. При значенні Re більше 13000 режим потоку стає стійким турбулентним.

Устрій експериментальної установки.

Схема установки наведена на рис. 2.2. Вода з резервуару 1 по відводу 3 через переливний бак 5 попадає в напірний бак 9. Надлишок води через зливальну лійку 6 і зливний шланг 7 зливається в каналізацію. З напірного бака по скляній трубі 12 через регулюючий вентиль 25 вода попадає в прийомний бак 23. У міру підвищення рівня води в баку підвищується тиск повітря в циліндрі 24, що фіксується вимірником об'єму (мікроманометром) 26. У скляну трубу 12 з посудини 29 через голчастий клапан 30 і капіляр 31 подається барвник. Відкачка води із прийомного бака здійснюється по трубопроводу 18 відцентровим насосом 20, що автоматично включається при відкриванні запірною крана 21 поворотом рукоятки 22.

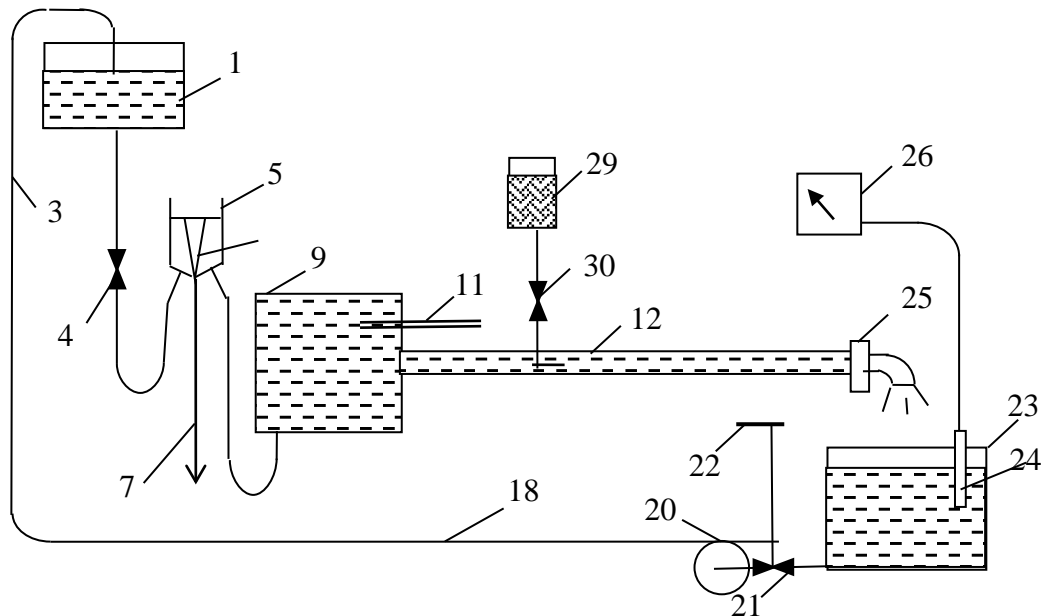


Рис 2.2

Схема експериментального стенду

Роботу починають із встановлення ламінарного режиму. Збільшуючи постійно швидкість руху води в скляній трубі, спостерігають за змінами, що відбуваються з підфарбованим струмком при різних режимах руху.

Примітка: При виконанні роботи стежити за тим, щоб не припинився перелив і не переповнився прийомний бак 23.

Після наочного вивчення поведження підфарбованого струмка приступають до виміру величин, необхідних для визначення числа Рейнольдса, починаючи з ламінарного й закінчуючи турбулентним режимами.

Методика проведення експерименту

1. Відкрити вентиль 4 і створити перелив
2. Відкрити кран 25
3. Відкрити голчастий клапан 30
4. Краном 25, міняючи витрату, установити ламінарний режим руху, замалювати картину руху й клапан 30 закрити
5. Зменшити перелив до мінімального
6. Повернути рукоятку 22 на 90° проти ходу годинної стрілки й відкачати воду із прийомного бака 23 доти, поки стрілка вимірника об'єму не переміститься в крайнє ліве положення
7. Повернути рукоятку 22 у первісне положення й приготувати секундомір
8. У момент перетину стрілкою приладу 6 поділки "0" включити секундомір
9. У момент перетину стрілкою приладу 6 поділки обраного об'єму (допустимо 5 літрів) зупинити секундомір
10. Поворотом рукоятки 22 включити насос і почати відкачку води із прийомного бака 23 в резервуар 1
11. Виміряти термометром 11 температуру води
12. Результати вимірів внести в таблицю
13. Відкрити вентиль 4, збільшивши перелив
14. Трохи відкривши кран 25, збільшити витрату води
15. Вентилем 4 установити мінімальний перелив
16. Відкривши клапан 30, проконтролювати характер руху струмка барвника, замалювати картину руху й клапан 30 знову закрити
17. Повторити по порядку дії, описані в пунктах 6-12

Виміри провести на п'яти-шести режимах і обробити експериментальні дані.

Обробка результатів експерименту

Результати візуальних спостережень, експериментальні й розрахункові дані заносяться в таблицю

| Найменування | Позначення | Розмірність | Номер опиту | | | | |
|--|-----------------|-------------------|-------------|---|---|---|---|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Внутрішній діаметр труби | $d_{\text{вн}}$ | м | | | | | |
| Об'єм рідини | V | м ³ | | | | | |
| Час заповнення об'єму | τ | с | | | | | |
| Температура рідини | t | °С | | | | | |
| Кінематичний коефіцієнт в'язкості | ν | м ² /с | | | | | |
| Витрата | Q | м ³ /с | | | | | |
| Середня швидкість | $V_{\text{ср}}$ | м/с | | | | | |
| Число Рейнольдса | Re | — | | | | | |
| Режим руху | | | | | | | |
| 10. Картина руху зафарбованого струмка | | | | | | | |

$$\text{Витрата } Q = \frac{V}{\tau}, \text{ м}^3/\text{с}$$

$$\text{Середня швидкість } V_{\text{ср}} = \frac{Q}{\omega} = \frac{Q}{0,785d_{\text{вн}}^2}, \text{ м/с}$$

$$\text{Число Рейнольдса } Re = \frac{V_{\text{ср}} \cdot d_{\text{вн}}}{\nu}$$

де ν - кінематичний коефіцієнт в'язкості, м²/с. Вибирається з таблиць залежно від температури води.

Контрольні питання

1. Які існують режими руху рідини й у чому їхнє розбіжності?

2. Які параметри впливають на режим руху рідини?
3. Як визначається для різних форм живого перерізу еквівалентний діаметр?
4. Що таке критична швидкість і критичне значення числа Рейнольдса?
5. Яка природа гідравлічних опорів при різних режимах руху?
6. Як впливає режим руху рідини на тепло- і масообмінні процеси?

Лабораторна робота № 3.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ЛІНІЇ ГІДРОДИНАМІЧНОГО НАПОРУ І П'ЄЗОМЕТРИЧНОЇ ЛІНІЇ

Мета

Вивчення рівняння Бернуллі. Дослідження зміни повної енергії потоку рідини в трубопроводі змінного поперечного перерізу, побудова п'єзометричної і напірної ліній.

Завдання

1. Експериментально визначити витрату рідини, середню швидкість і показання п'єзометрів на всіх ділянках трубопроводу для кожного режиму руху.
2. Побудувати п'єзометричну і напірну лінію.

Теоретичні положення

У гідравліці закон збереження енергії стосовно рухомої рідини виражається рівнянням Бернуллі. Записане для потоку реальної рідини рівняння Бернуллі має наступний вигляд [1,4]:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_{cp1}^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_{cp2}^2}{2g} + h_{випр}$$

Повний напір струминки ідеальної рідини по всій її довжині є величина постійна.

$$H = z + \frac{P}{\rho g} + \alpha \frac{V_{cp}^2}{2g} - \text{повний гідродинамічний напір.}$$

Для струминки ідеальної рідини по всій її довжині сума трьох видів питомої механічної енергії є величина постійна

Геометричний зміст рівняння Бернуллі.

Z – відстань від центру ваги перерізу до площини порівняння, називається геометричним напором або геометричною висотою.

$h = \frac{P}{\rho g}$ – відстань від центру ваги перерізу до рівня рідини в п'єзометрі,

називається п'єзометричним напором або п'єзометричною висотою.

$\alpha \frac{V_{cp}^2}{2g}$ – відстань від рівня рідини в п'єзометрі до рівня рідини в трубці

Піто, називається швидкісним напором або висотою швидкісного напору.

Енергетичний зміст рівняння Бернуллі.

Z – питома потенційна енергія положення;

$h = \frac{P}{\rho g}$ – питома потенційна енергія тиску;

$\alpha \frac{V_{cp}^2}{2g}$ – питома кінетична енергія .

$h_{\text{втр}}^{\text{втр}}$ – втрати питомої енергії (напору) по довжині трубопроводу і в місцевих опорах на ділянці між перерізами 1-1 і 2-2;

α – коефіцієнт Коріоліса, що враховує нерівномірність розподілу швидкостей по живому перерізу потоку; і є відношенням кінетичної енергії потоку, розрахованої по дійсній швидкості, до кінетичної енергії потоку, розрахованої по його середній швидкості

Лінія, проведена через рівень рідини в трубці Піто, називається напірною лінією. Вона показує зміну повного напору уздовж струминки рідини. Лінія, проведена по рівню рідини в п'єзометрах, називається п'єзометричною лінією. Вона показує зміну п'єзометричного напору уздовж струминки рідини.

П'єзометрична лінія знаходиться нижче напірною на висоту швидкісного натиску.

Устрій експериментального стенду.

Методика проведення експерименту

Робоча ділянка представлена горизонтальним трубопроводом змінного перерізу, на одній з ділянок якого встановлений пробковий кран, який служить місцевим опором. На початку і в кінці кожної ділянки (рис.3.1) встановлені п'єзометри. Вода з напірного бака 9 через робочу ділянку поступає в мірну ємність 6. Методика проведення експерименту полягає у вимірюванні п'єзометричних висот при різних витратах води, регульованих корковим краном 25.

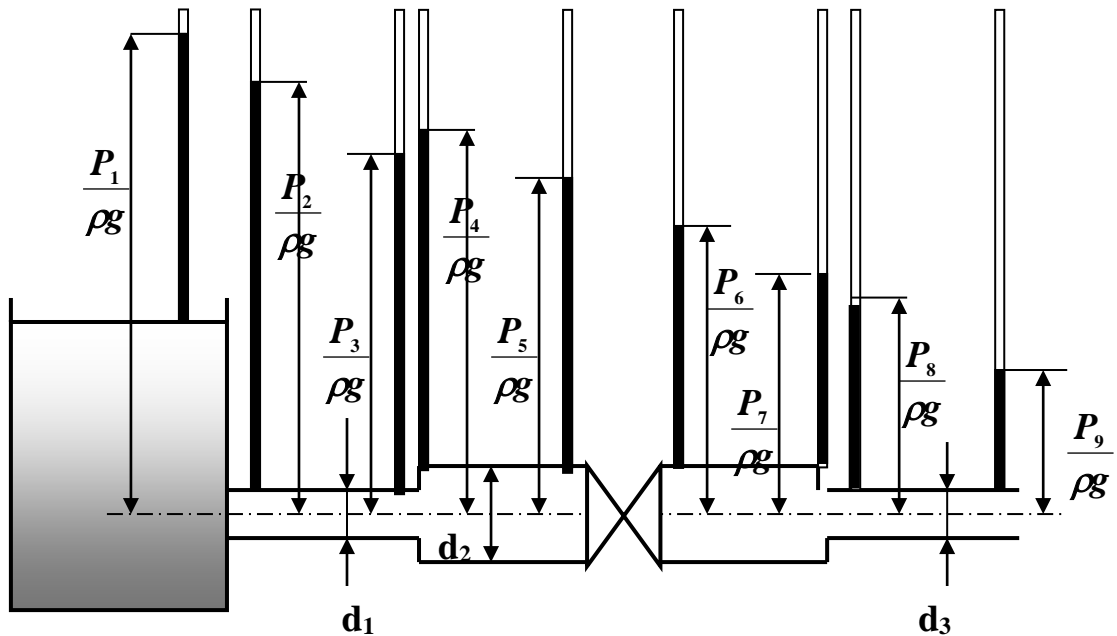


Рис. 3.1

Схема робочої ділянки

Обробка результатів експерименту

Витрата рідини $Q = \frac{V}{\tau}$, м³/с

Середні швидкості на окремих ділянках $V_{cp} = \frac{Q}{\omega_i}$, м/с, де $\omega_i = \frac{\pi d_i^2}{4}$

Всі експериментальні і розрахункові дані вносяться до таблиці

| Найменування величин | Позначення | Розмірність | Номер опиту | | | | |
|---|-------------------------------------|-----------------------|-------------|---|---|---|---|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1. Діаметр ділянок трубопроводів ділянки 1 ділянки 2 ділянки 3 | d_1 d_2 d_3 | м м м | | | | | |
| 2. Об'єм рідини | V | м^3 | | | | | |
| 3. Час витікання заданого об'єму рідини | τ | с | | | | | |
| 4. Об'ємна витрата | Q | $\text{м}^3/\text{с}$ | | | | | |
| 5. Середня швидкість на ділянках ділянка 1 ділянка 2 ділянка 3 | V_{1cp} V_{2cp} V_{3cp} | м/с м/с м/с | | | | | |
| 6. Показання п'єзометрів | $P_{1..9} / \rho g$ | м | | | | | |
| 7. Загальні втрати напору в трубопроводі | $h_{випр}$ | м | | | | | |

Для кожного режиму руху записуються показання всіх п'єзометрів. Для побудови напірної лінії до показань п'єзометрів додаються відповідні значення швидкісних напорів $\alpha_i \frac{V_i^2}{2g}$. Величини $\alpha_i; V_i$ розраховуються для кожного перерізу.

За показаннями п'єзометра і відповідними ним величинами швидкісних напорів у відповідному масштабі будуються напірна і п'єзометрична лінії.

Контрольні питання

1. Що називається напірною лінією?
2. Що називається п'єзометричною лінією?
3. Який геометричний і енергетичний зміст рівняння Бернуллі?
4. Який фізичний зміст коефіцієнта Коріоліса?
5. Яким буде взаємне положення напірної і п'єзометричної ліній при перебігу реальної рідини в трубопроводі, що плавно звужується (що розширюється)?
6. Через яку точку вихідного перерізу трубопроводу пройде п'єзометрична лінія при витіканні рідини в атмосферу?

Лабораторна робота № 4

ТАРУВАННЯ ВИТРАТОМІРНОГО ПРИСТРОЮ

Мета

Вивчення принципу дії і конструкції дросельних витратомірів. Використання рівняння Бернуллі для отримання тарованої кривої.

Завдання.

1. Експериментально визначити витрату рідини, середню швидкість і коефіцієнт витрати для кожного режиму руху.
2. Побудувати тарувальну криву і криву залежності коефіцієнта витрати від режиму руху рідини для одного з витратомірів

Теоретичні положення.

Дроселювання потоку рідини полягає в зменшенні тиску у вузькому перерізі потоку в порівнянні з тиском в попередньому перерізі за рахунок збільшення швидкості руху у вузькому перерізі. Між перепадом напору в контрольних перерізах h і витратою рідини Q існує певний зв'язок, який використовується для вимірювання витрати $Q = C\sqrt{h}$ [1,3]. У цей зв'язок також вхо-

дять такі фактори як коефіцієнти Коріоліса в широкому і вузькому перерізах і коефіцієнт місцевого опору. Вплив вказаних факторів враховується коефіцієнтом витрати дросельного витратоміра:

$$C = \sqrt{\frac{2g}{\frac{\alpha_2}{\omega_2^2} - \frac{\alpha_1}{\omega_1^2} + \frac{\xi}{\omega_2^2}}};$$

де α_1, α_2 – коефіцієнти Коріоліса; ω_1, ω_2 - площа перерізу каналу у перерізах 1 і 2, ξ - коефіцієнт місцевого опору витратоміра.

Графік залежності $Q = f(h)$ називається тарувальною кривою.

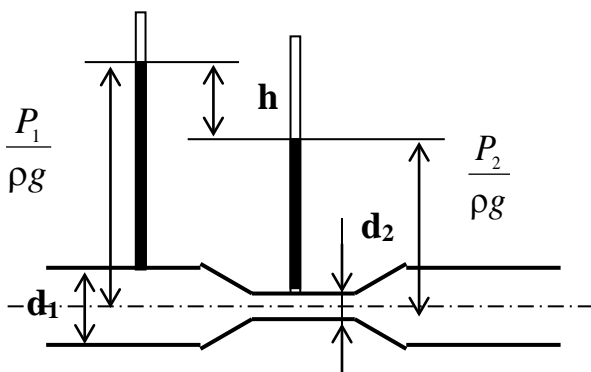


Рис.4.1

Витратомір Вентурі

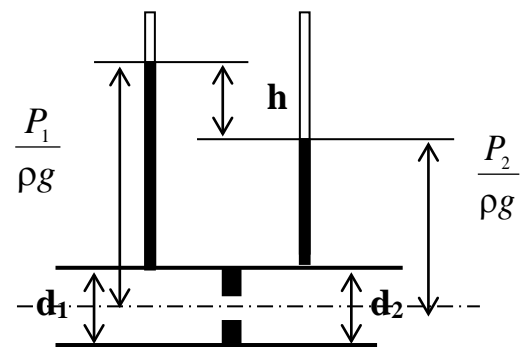


Рис.4.2

Витратомірна діафрагма

Тарування – це експериментальне визначення залежності (аналітичної або графічної) між показаннями вимірювального прибору і вимірюваною величиною. В даній роботі показаннями вимірювального прибору (витратомірний пристрій) являється різниця h між рівнями рідини в п'єзометрах, які встановлені в широкому і вузькому перерізі, а вимірюваною величиною – витрата Q . Тарування витратоміру проводять з тим, щоб по значенню h , яке можна безпосередньо вимірювати, визначати значення необхідної величини Q .

Устрій експериментальної установки. Методика проведення експерименту

Дросельний витратомір встановлений на робочій ділянці 13 (див. схему комплексного стенду на рис.1). Вода з резервуару 1 через регулювальний вентиль 4 поступає в переливний бак 5. Частина рідини через відкритий кран 8 потрапляє в напірний бак 9, а надлишок зливається в каналізацію через переливну воронку 6 по шлангу 7. З напірного бака 9 вода поступає на робочу ділянку 13, де встановлений дросельний витратомір. Тиск до і після витратоміру вимірюється п'єзометрами 32 і 33. Регулювання витрати води здійснюється корковим краном 25.

Для проведення експерименту необхідно:

Відкрити регулювальний вентиль 4 і створити перелив. Плавню відкриваючи кран 25, встановити рівень рідини (води) в п'єзометрі 32 на відмітці 830 ÷ 850 мм. Поворотом рукоятки 22 на 90⁰ відкачати воду з приймального бака 23. Виміряти час протікання заданого об'єму рідини, включивши секундомір у момент поєднання стрілки вимірника об'єму 26 з відміткою «0» і включивши його у момент поєднання стрілки з відміткою заданого об'єму. Одночасно проводиться вимір температури рідини і показання п'єзометрів 32 і 33. Відкачати воду з приймального бака і, привідкривши кран 25 так, щоб рівень рідини в п'єзометрі 32 знизився на 70-80 мм, повторити виміри.

Обробка результатів експерименту

Витрата рідини $Q = \frac{V}{\tau}, \text{ м}^3/\text{с}$

Різниця показань п'єзометрів $h = \frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_2}{\rho g}, \text{ м}$

Коефіцієнт витрати $C = \frac{Q}{\sqrt{h}}, \text{ м}^{2,5}/\text{с}$

Середня швидкість $V_{cp} = \frac{Q}{\omega}, \text{ м}/\text{с}$

Число Рейнольдса $Re = \frac{V_{cp} \cdot d_1}{\nu}$

Опитні і розрахункові величини заносяться в таблицю

| Найменування | Позначення | Розмірність | № опиту | | | | |
|-----------------------------------|----------------|---------------|---------|---|---|---|---|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Діаметр труби | d | m | | | | | |
| Об'єм рідини | V | m^3 | | | | | |
| Температура рідини | t | $^{\circ}C$ | | | | | |
| Кінематичний коефіцієнт в'язкості | ν | m^2 / c | | | | | |
| Час витікання | τ | $з$ | | | | | |
| Показання I п'єзометра | $P_1 / \rho g$ | m | | | | | |
| Показання II п'єзометра | $P_2 / \rho g$ | m | | | | | |
| Різниця показань | h | m | | | | | |
| Витрата рідини | Q | m^3 / c | | | | | |
| Середня швидкість | V_{cp} | m / c | | | | | |
| Коефіцієнт витрати | C | $m^{2.5} / c$ | | | | | |
| Число Рейнольдса | Re | - | | | | | |

Будується тарувальна крива $Q = f(h)$ і графік залежності коефіцієнта витрати від режиму руху швидкості $C = f(Re)$

Контрольні питання

1. Який принцип дії дросельного витратоміру?
2. Які типи дросельних витратомірів використовуються в техніці?
3. Які характерні особливості різних дросельних витратомірів?
4. Що називається коефіцієнтом витрати дросельного витратоміру?
5. Як залежить коефіцієнт витрати від режиму руху рідини?

Лабораторна робота № 5.

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ОПОРУ ПО ДОВЖИНІ ТРУБОПРОВОДУ

Мета

Вивчити фізичний механізм появи витрат енергії по довжині трубопроводу та методи визначення коефіцієнта опору λ по довжині трубопроводу

Завдання

1. Зробити необхідні експериментальні виміри та розрахувати коефіцієнт λ .
2. Побудувати графік залежності коефіцієнта λ від режиму руху рідини

Теоретичні положення

Одним з найважливіших питань гідравліки є визначення витрат енергії при русі рідини. В загальному випадку руху рідини по трубопроводах розрізняють втрати енергії по довжині трубопроводу (h_l) і в місцевих опорах (h_r). Витрати по довжині обумовлені силами внутрішнього тертя між шарами рідини, що рухається. Ці витрати обумовлені переходом частини механічної енергії в теплову, що є незворотним процесом. Для визначення втрати напору по довжині використовують формулу Дарсі

$$h_l = \lambda \frac{l}{d_e} \cdot \frac{V_{cp}^2}{2g}, \text{ м}$$

де λ - коефіцієнт опору по довжині; l - довжина ділянки труби, м;
 d_e - еквівалентний діаметр труби, м; V_{cp} - середня швидкість руху рідини, м/с;
 g - прискорення сили ваги

Коефіцієнт опору по довжині труби визначається залежно від режиму руху рідини.

При ламінарному режимі ($Re < 2300$) λ обчислюється по теоретичній формулі Пуазейля:

$$\lambda = \frac{64}{Re}$$

При турбулентному режимі розрахункові формули для визначення λ вибираються залежно від співвідношення товщини ламінарної плівки δ і еквівалентної шорсткості стінки труби Δ . При цьому розділяють гідравлічно гладкі труби, для яких $\delta \gg \Delta$, гідравлічно шорсткуваті труби – $\delta \ll \Delta$, і труби перехідної зони при $\delta \approx \Delta$. Для кожного з типу труб існують розрахункові залежності, що визначають λ . Визначити, до якого типу відноситься даний трубопровід, можна за допомогою комплексу $M = Re \frac{\Delta}{d_e}$, де d_e - еквівалентний діаметр трубопроводу.

Для гідравлічно гладких труб $M < 10$. Коефіцієнт опору залежить тільки від числа Рейнольдса й визначається формулою Блазіуса:

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}$$

Для перехідної зони $10 < M < 500$. Для коефіцієнта опору λ рекомендується формула Альтшуля:

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

Для гідравлічно шорсткуватих труб $M > 500$. Коефіцієнт опору не залежить від числа Рейнольдса. а визначається тільки еквівалентною шорсткістю $\frac{\Delta}{d}$ і може бути визначений по формулі Шифрінсона:

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta}{d_e} \right)^{0,25}$$

Наведені формули [2,4] отримані експериментально для труб круглого перерізу, виконаних зі сталі й чавуну. Для полімерних і скляних труб, а також для труб некруглого перерізу, розрахунок по цих формулах приводить до росту похибки, тому рекомендується зі спеціальної літератури підбирати відповідні залежності [5].

Для експериментального визначення λ може бути використана формула Дарсі:

$$\lambda_{\text{екс}} = \frac{2gd_e}{l \cdot V_{\text{ср}}^2} \cdot h_1;$$

Устрій експериментального стенда.

У даному експерименті робота проводиться на робочій ділянці 14 (див. схему комплексного стенда рис.1).

Вода з резервуара 1 через регулювальний вентиль 4 надходить у переливний бак 5. Частина рідини через відкритий клапан 8 попадає в напірний бак 9, а надлишок зливається в каналізацію через переливну лійку 6 по шлангу 7. З напірного бака 9 вода надходить у робочу ділянку 14. В початковому й кінцевому перерізі робочої ділянки встановлені п'єзометри 32 і 33. Регулювання витрати води здійснюється корковим краном 25.

Методика проведення експерименту

Відкрити вентиль 4 і створити перелив. Відкрити кран 25. Краном 25, міняючи витрату, встановити мінімальну витрату води, відповідну ламінарному режиму руху. Зменшити перелив до мінімального. Повернути рукоятку 22 на 90° проти ходу годинникової стрілки й відкачати воду із прийомного бака 23 доти, поки стрілка вимірника 26 об'єму не переміститься в крайнє ліве положення. Повернути рукоятку 22 у первісне положення й приготувати секундомір. У момент перетину стрілкою приладу 26 з поділкою "0" включити секундомір. Виміряти термометром 11 температуру води. У момент перетину стрілкою вимірника витрати 26 поділки обраного обсягу (допустимо 2,5 – 5 літрів) зупинити секундомір. Поворотом рукоятки 22 включити насос і відкачати воду із прийомного бака 23. Результати вимірів внести в таблицю. Відкрити вентиль 4, збільшивши перелив. Небагато відкривши кран 25, збільшити витрату води. Вентилем 4 установити мінімальний перелив. Повторити по порядку дії, описані в пунктах 6 – 12. Виміри провести на п'яти режимах і обробити експериментальні дані.

Обробка результатів експерименту

Опитні й розрахункові величини заносяться в таблицю

| Найменування | Позначення | Розмірність | № опиту | | | | |
|-----------------------------------|----------------------|-------------------|---------|---|---|---|---|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Діаметр труби | d | м | | | | | |
| Об'єм рідини | V | м ³ | | | | | |
| Температура рідини | t | °С | | | | | |
| Кінематичний коефіцієнт в'язкості | ν | м ² /с | | | | | |
| Час витікання | τ | с | | | | | |
| Показання I п'єзометра | $\frac{P_1}{\rho g}$ | м | | | | | |
| Показання II п'єзометра | $\frac{P_2}{\rho g}$ | м | | | | | |
| Витрати напору | h_l | м | | | | | |
| Витрата рідини | Q | м ³ /с | | | | | |
| Середня швидкість | V_{cp} | м/с | | | | | |
| Коефіцієнт опору по довжині | λ | - | | | | | |
| Довжина робочої ділянки | l | м | | | | | |
| Число Рейнольдса | Re | - | | | | | |

Витрата рідини $Q = \frac{V}{\tau}; \text{ м}^3/\text{с}$

Середня швидкість $V_{cp} = \frac{Q}{\omega}; \text{ м/с}$, де $\omega = \frac{\pi d^2}{4}$ - площа живого перерізу, м²

Витрати напору по довжині $h_l = \frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_2}{\rho g}; \text{ м}$

Будується графік залежності коефіцієнта опору по довжині від режиму руху рідини $\lambda = f(\text{Re})$.

Контрольні питання

1. Які види витрат напору розрізняють при русі рідини по трубах.
2. Яка залежність між витратами напору й швидкістю руху рідини при ламінарному й турбулентному режимі її руху?
3. Як визначається величина витрат напору по довжині труби без урахування місцевих опорів?
4. Які формули використовуються при визначенні коефіцієнта гідравлічного тертя? Що впливає на вибір необхідної розрахункової формули?
5. Як дослідним шляхом визначити питомі витрати напору на ділянці прямої горизонтальної труби?
7. Від яких параметрів залежить величина коефіцієнта гідравлічного тертя?

Лабораторна робота № 6.

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА МІСЦЕВОГО ОПОРУ

Мета

Ознайомлення з існуючими типами місцевих опорів, вивчення механізму витрати енергії при подоланні місцевого опору та принципу розрахунку витрат.

Завдання

Визначити дослідним шляхом чисельні значення коефіцієнта місцевого опору ζ й побудувати графік залежності ζ від режиму руху рідини.

Теоретичні положення

На окремих ділянках трубопроводу, де відбуваються зміни площі перерізу потоку, форми перерізу потоку або напрямку його руху, виникають місцеві втрати напору, обумовлені переходом одного виду механічної енергії в

іншу, виникненням місцевих відривів струменя від стінок, а отже, появою вихрових областей.

Теоретично визначені втрати напору й значення коефіцієнтів місцевих опорів - раптового розширення й раптового звуження потоку. Для всіх інших видів місцевого опору ζ визначаються дослідним шляхом [5].

Вейсбахом було запропоновано обчислювати місцеві втрати напору по формулі:

$$h_M = \zeta \frac{V_{cp}^2}{2g};$$

де ζ - коефіцієнт місцевого опору, віднесений до швидкісного напору за місцевим опором;

V_{cp} - середня швидкість руху рідини за місцевим опором.

Рівняння Бернуллі, складеного для двох контрольних перерізів (перше - перед і друге - за місцевим опором):

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_{cp1}^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_{cp2}^2}{2g} + h_{sum};$$

Якщо довжина ділянки між обраними перерізами невелика, можна прийняти втрати по довжині $h_l=0$, витрати напору в місцевому опорі визначаються, як:

$$h_M = \left(Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} \right) - \left(Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} \right) + \frac{\alpha_1 V_{cp1}^2 - \alpha_2 V_{cp2}^2}{2g};$$

При горизонтальному розташуванні трубопроводу $Z_1=Z_2$, отже

$$h_r = \frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V_{cp1}^2 - \alpha_2 V_{cp2}^2}{2g};$$

де $\frac{P_1}{\rho g}$ и $\frac{P_2}{\rho g}$ - покази п'езометрів, установлених у контрольних перерізах, м.

Методика проведення експерименту

Місцевий опір установлений на робочій ділянці 13 (см. рис.6.1).

Методика проведення експерименту подібна описаній в лабораторній роботі № 4.

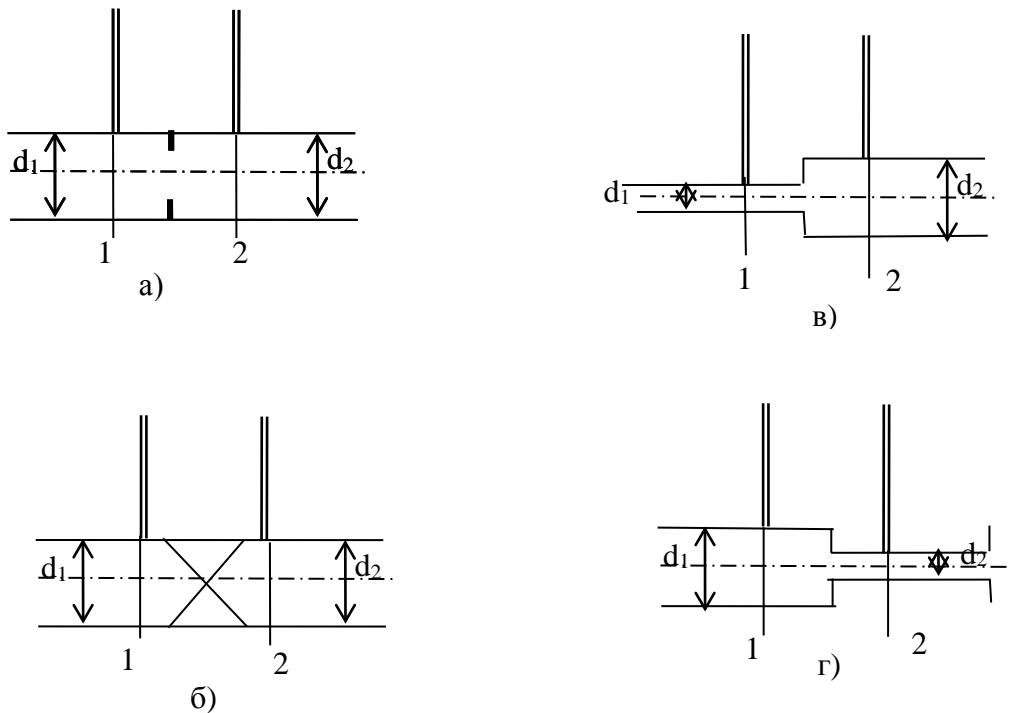


Рис.6.1. Види місцевих опорів. а) – діафрагма, б) – корковий кран, в) – раптове розширення, г) - раптове звуження

Обробка результатів експерименту

Витрата рідини $Q = \frac{V}{\tau}$, м³/с

Середні швидкості в контрольних живих перерізах $V_{cp2} = \frac{Q}{\omega_2}$; м/с

де $\omega_i = \frac{\pi d_i^2}{4} = 0,785 d_i^2$, м² – площа живого перерізу. Втрата напору в місцевому опорі:

$$h_M = \frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V_{cp1}^2 - \alpha_2 V_{cp2}^2}{2g}, \text{ м}$$

Експериментальне значення коефіцієнта місцевого опору $\zeta = \frac{2g}{V_{cp2}^2} \cdot h_M$

Число Рейнольда $Re = \frac{V_{cp2} \cdot d}{\nu}$

Всі експериментальні й розрахункові величини вносяться в таблицю

| Найменування величин | Позначення | Розмірність | № опиту | | | | |
|--|--------------|-------------------|---------|---|---|---|---|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1. Діаметр 1-го контрольного перерізу | d_1 | м | | | | | |
| 2. Діаметр 2-го контрольного перерізу | d_2 | м | | | | | |
| 3. Об'єм рідини | V | м ³ | | | | | |
| 4. Час витікання | τ | с | | | | | |
| 5. Показання п'езометра до місцевого перерізу | $P_1/\rho g$ | м | | | | | |
| 6. Показання п'езометра після місцевого опору | $P_2/\rho g$ | м | | | | | |
| 7. Об'ємна витрата | Q | м ³ /с | | | | | |
| 8. Середня швидкість в 1-ому контрольному перерізі | V_{1cp} | м/с | | | | | |
| 9. Середня швидкість в 2-ому контрольному перерізі | V_{2cp} | м/с | | | | | |
| 10. Втрати напору | h_M | м | | | | | |
| 11. Коефіцієнт місцевого опору | ζ | - | | | | | |

Контрольні питання

1. Що являють собою й чим пояснюються місцеві втрати напору?
2. Як визначаються місцеві втрати напору при раптовому розширенні потоку?
3. Як визначається теоретичне значення коефіцієнта місцевого опору при раптовому розширенні й звуженні потоку?
4. Як визначаються втрати напору для будь-якого типу місцевого опору?

5. Як визначити втрати напору на місцевому опорі за допомогою рівняння Бернуллі?
6. Як визначити експериментальне значення коефіцієнта місцевого опору?
7. Чи залежить коефіцієнт місцевого опору від режиму руху рідини?

Лабораторна робота № 7

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ, ЩО ХАРАКТЕРИЗУЮТЬ ВИТІКАННЯ РІДИНИ ЧЕРЕЗ ОТВІР З ГОСТРОЮ КРОМКОЮ ПРИ ПОСТІЙНОМУ НАПОРІ

Мета

Вивчення процесу витікання через отвір з гострою кромкою. Експериментальне визначення коефіцієнтів, що характеризують даний процес

Завдання

1. Дослідити візуально, замалювати і описати характер витікання рідини через отвір з гострою кромкою.
2. Визначити експериментально значення коефіцієнтів швидкості φ , втрати μ і стиснення струменя при різних напорах.
3. Побудувати графік залежності коефіцієнтів φ та μ від Re .

Теоретичні положення

При витікання рідини через отвір з гострою кромкою частинки рідини переміщається по плавно зігнутій траєкторії, що викликає виникнення відцентрових сил, направлених до осі струменя. На деякому віддаленні від площини отвору (для круглих отворів $l = 0,5d$) кривизна ліній струменя зменшується і рух набуває практично паралельно-струменевого характеру. У цьому «стислому перерізі» спостерігається значне зменшення площі перерізу струменя [4]. Відношення площі «стислого перерізу» струменя (ω_c) до площі отвору (ω_0) називають коефіцієнтом стиснення струменя:

$$\varepsilon = \frac{\omega_c}{\omega_o};$$

Для отримання розрахункової формули витрати розглянемо рівняння Бернуллі для перерізів 1-1 і 2-2 (рис. 7.1)

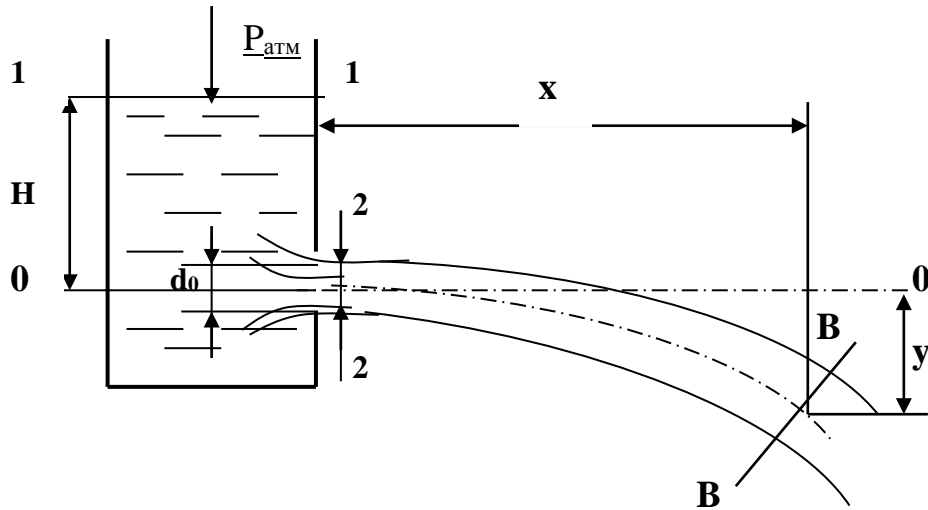


Рис.7.1

Витікання рідини через отвір з гострою кромкою

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_{cp1}^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_{cp2}^2}{2g} + h_{вум}$$

Швидкісний натиск в перерізі 1-1 дуже малий в порівнянні з швидкісним напором в перерізі 2-2 $\alpha_1 \frac{V_{cp1}^2}{2g} = 0$, а втрати напору $h_{вум} = \zeta \frac{V_{cp2}^2}{2g}$.

Середня швидкість руху рідини в стислому перерізі струменя

$$V_2 = V_c = \sqrt{\frac{2gH}{\alpha_1 + \zeta}} = \frac{1}{\sqrt{\alpha_2 + \zeta}} \cdot \sqrt{2gH}$$

Теоретична швидкість витікання рідини по формулі Торрічеллі

$$V_T = \sqrt{2gH},$$

а відношення

$$\varphi = \frac{V_c}{V_T} = \frac{1}{\sqrt{\alpha_c + \zeta}}$$

називають коефіцієнтом швидкості. У фізичному сенсі коефіцієнт швидкості є відношення дійсної швидкості витікання до теоретичної швидкості .

Об'ємна витрата рідини

$$Q = V_c \cdot \omega_c = \varphi \cdot V_T \cdot \varepsilon \cdot \omega_o = \mu \cdot Q_T$$

де : $\mu = \varphi \cdot \varepsilon$ - коефіцієнт витрати; $Q_T = \omega_o \cdot V_T$ - теоретична витрата рідини.

Коефіцієнт витрати по фізичному сенсу є відношенням дійсної витрати при витікання до теоретичної витрати.

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

Остаточне розрахункове рівняння для об'ємної витрати має вигляд

$$Q = \mu \cdot \omega_o \cdot \sqrt{2gH}$$

Коефіцієнт швидкості може бути визначений експериментально. Траєкторія струменя описується рівнянням параболи і, отже, координати центру тяжіння будь-якого живого перерізу струменя визначаються виразами (рис. 7.1)

$$x = V_c \cdot \tau; \quad y = \frac{1}{2} g \cdot \tau^2$$

де τ – час руху частинки рідини від перерізу 2-2 до даного перерізу (В-В).

Вирішуючи спільно ці рівняння, знаходимо:

$$V_c = \sqrt{\frac{gx^2}{2y}}, \text{ або } \varphi \sqrt{2gH} = \sqrt{\frac{gx^2}{2y}}, \text{ звідки } \varphi = \frac{x}{2\sqrt{y \cdot H}}$$

Устрій експериментального станду.

Методика проведення експерименту

Робота проводиться на робочій ділянці 15 (див. схему комплексного станду). Вода з напірного бака 9 при відкритому клапані 16 через отвір в шайбі 15 витікає в приймальний бак 23. Переміщенням переливного бака 5 встановлюють заданий напір H по п'єзометру 10. Кількість рідини, що поступила в приймальний бак, визначається по показанню вимірника витрати 26.

Для проведення експерименту необхідно:

Встановити в обоймі шайбу 15 з отвором. Відкрити регулюючий вентиль 4 і створити перелив. Відкрити клапан 16 і, переміщаючи переливний бак 5,

встановити на п'єзометрі 10 заданий напір H . Відкачати воду з приймального бака і провести вимір часу закінчення заданого об'єму рідини. Зміряти координати центру струменя на рівні краю лотка. Опит повторювати 5-6 разів при різних значеннях напору.

Обробка результатів експерименту

Дійсна витрата рідини $Q = \frac{V}{\tau}$, м³/с

Коефіцієнт витрати $\mu = \frac{Q}{Q_t} = \frac{Q}{\omega_o \cdot \sqrt{2gH}}$

Швидкісний коефіцієнт $\varphi = \frac{x}{2\sqrt{yH}}$

Коефіцієнт стиснення струменя $\varepsilon = \frac{\mu}{\varphi}$

Коефіцієнт опору (з виразу $\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha_2 + \zeta}}$)

$$\zeta = \frac{1}{\varphi^2} - \alpha_c$$

Дослідні і розрахункові величини вносяться до таблиці

| Найменування величин | Позначення | Розмірність | № опиту | | | | |
|-----------------------------|------------|-------------------|---------|---|---|---|---|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1. Діаметр отвору | d_o | м | | | | | |
| 2. Напір | H | м | | | | | |
| 3. Об'єм рідини | V | м ³ | | | | | |
| 4. Температура рідини | t | °С | | | | | |
| 5. Час витікання | τ | с | | | | | |
| 6. Вертикальна координата | y | м | | | | | |
| 7. Горизонтальна координата | x | м | | | | | |
| 8. Витрата | Q | м ³ /с | | | | | |
| 9. Коефіцієнт витрати | μ | - | | | | | |
| 10. Коефіцієнт швидкості | φ | - | | | | | |
| 11. Коефіцієнт опору | ζ | - | | | | | |

Вимірювання розподілу швидкості в стислому перерізу струменя дозволяють вважати їх майже однаковими і вважати $\alpha_c = 1$

Тоді $\zeta = \frac{1}{\varphi^2} - 1$

Побудувати графік залежності коефіцієнтів φ та μ від Re .

Контрольні питання

1. Що називається коефіцієнтом витрати?
2. Що називається коефіцієнтом швидкості?
3. Що називається коефіцієнтом стиснення?
4. Які особливості витікання рідини через отвори?
5. Від яких чинників залежить величина коефіцієнта витрати при витіканні через отвори?

Лабораторна робота № 8

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ, ЩО ХАРАКТЕРИЗУЮТЬ ВИТІКАННЯ РІДИНИ ЧЕРЕЗ НАСАДОК, ПРИ ПОСТІЙНОМУ НАПОРІ

Мета

Вивчення процесу витікання через циліндричний насадок. Експериментальне визначення коефіцієнтів, що характеризують даний процес

Завдання

4. Дослідити візуально, замалювати і описати характер витікання рідини через циліндричний насадок.
5. Визначити експериментальне значення коефіцієнтів швидкості, витрати і стиснення струменя при різних напорах.
6. Побудувати графік залежності цих коефіцієнтів від відносного напору H/d_o .

Теоретичні положення

Насадками називають короткі трубки, довжиною $(3 \div 5)d_o$, приєднані до отвору. Насадки бувають різних типів [2]:

- циліндричні - зовнішні і внутрішні
- конічні - що сходяться і що розходяться
- коноїдальні.

Циліндричні насадки застосовують для збільшення витрати рідини. При вході в циліндричний насадок струмінь рідини стискається так само, як і при виході з отвору. За стислим перерізом струмінь розширюється і на виході заповнює весь переріз насадка (рис. 8.1). У стислому перерізі утворюється вакуум, що збільшує пропускну спроможність насадка в порівнянні з отвором в стінці.

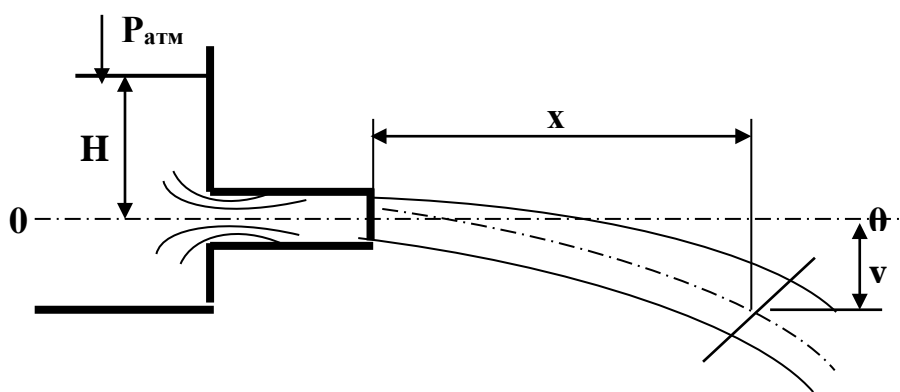


Рис. 8.1

Витікання рідини з циліндричного насадка

При однакових діаметрах вхідних отворів конічний насадок, що розходиться, забезпечує найбільшу витрату, оскільки в області стислого перерізу створюється значно більший вакуум, чим в циліндрових насадках.

Витрата через конічний насадок, що сходиться, менша, ніж через отвір з гострою кромкою. Основне призначення конічних насадків, що сходяться – збільшувати швидкість виходу потоку для створення в струмені великої кінетичної енергії. У коноїдальному насадку профіль відповідає форми струменя.

Швидкість на виході з насадка дорівнює $V = \varphi_n \sqrt{2gH}$

де: $\varphi_n = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \Sigma \zeta}}$ – коефіцієнт швидкості насадку; $\Sigma \zeta$ – сумарний коефіцієнт опору, що враховує всі втрати натиску, які виникають при русі потоку через насадок. Витрата рідини через насадок [2,4]:

$$Q = \mu_n \omega_0 \sqrt{2gH}$$

де: μ_n - коефіцієнт витрати насадку; ω_0 – площа отвору.

Устрій експериментального стенду.

Методика проведення експерименту

Опис установки і методики проведення експерименту приведені в лабораторній роботі № 7.

Обробка результатів експерименту

Опитні і розрахункові величини вносяться до таблиці

| Найменування величин | Позначення | Розмірність | № опиту | | | | |
|--------------------------|------------|-------------------|---------|---|---|---|---|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Діаметр отвору | d_o | м | | | | | |
| Напір | H | м | | | | | |
| Об'єм рідини | V | м ³ | | | | | |
| Температура рідини | t | °C | | | | | |
| Час витікання | τ | с | | | | | |
| Вертикальна координата | y | м | | | | | |
| Горизонтальна координата | x | м | | | | | |
| Витрата | Q | м ³ /с | | | | | |
| Коефіцієнт витрати | μ | - | | | | | |
| Коефіцієнт швидкості | φ | - | | | | | |
| Коефіцієнт опору | ζ | - | | | | | |

Дійсна витрата рідини $Q = \frac{V}{\tau}$, м³/с

Коефіцієнт витрати $\mu_H = \frac{Q}{Q_T} = \frac{Q}{\omega_o \cdot \sqrt{2gH}}$

Швидкісний коефіцієнт $\varphi = \frac{x}{2\sqrt{yH}}$

Коефіцієнт стиснення струменя $\varepsilon = \frac{\mu_H}{\varphi}$

Коефіцієнт опору $\zeta = \frac{1}{\varphi^2} - 1$

Побудувати графік залежності коефіцієнтів φ та μ від Re .

Контрольні питання

1. Що називається насадком?
2. Які особливості закінчення рідини через насадки?
3. Чим обумовлено утворювання вакууму за вхідним перерізом насадка?
4. Які насадки характеризуються найбільшим гідравлічним опором?
5. Які насадки забезпечують найбільшу швидкість закінчення?
6. Які насадки забезпечують найбільшу витрату?
7. Чому коефіцієнт швидкості для циліндричного насадка менший, ніж для отвору?
8. Чому витрата через циліндричний насадок менша, ніж через отвір того ж діаметру?

Лабораторна робота № 9

ВИПРОБУВАННЯ ВІДЦЕНТРОВОГО НАСОСУ

Мета

Вивчити конструкцію й принцип дії відцентрового насоса, дослідити роботу насоса і отримати основні показники його роботи.

Завдання

1. Провести експеримент і отримати основні первинні дані по роботі насоса при різних режимах.

2. Розрахувати повний напір насоса, корисну потужність і коефіцієнта корисної дії на визначених режимах.
3. Побудувати характеристики насоса: залежність напору, потужності й коефіцієнта корисної дії від витрати рідини.

Теоретичні положення

Відцентровий насос - це гідравлічна машина, призначена для підвищення внутрішньої механічної енергії рідини. Складається насос із корпуса з

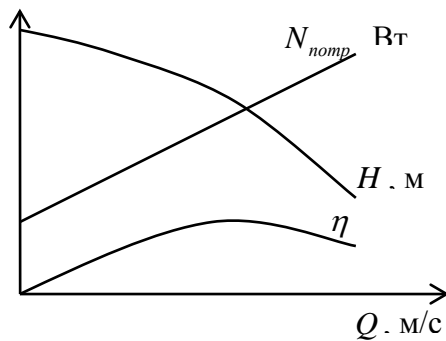


Рис.9.1 Характеристики насоса

равликоподібним каналом і робочого колеса, посаженого на вал, що через муфту з'єднаний з валом електродвигуна. Робоче колесо виконане у вигляді двох дисків з розташованими між ними вигнутими або прямими лопатками. Рідина, що перебуває в міжлопатковому

просторі, приводиться в обертання разом з робочим колесом. При цьому кожна частка рідини переміщається по складній траєкторії. По-перше, відцентрова сила, що виникає при обертанні, змушує її рухатися радіально уздовж лопаток від осі колеса до периферії. По-друге, рідина, що захоплюється лопатками обертового колеса, крім радіальної швидкості, здобуває ще окружну швидкість, однакову зі швидкістю колеса. Так як окружна швидкість на периферії колеса більше, ніж у входу на лопатки, то абсолютна швидкість рідини на виході з колеса стає більше, ніж на вході. Таким чином, рідина, що проходить через робоче колесо центрального насоса, здобуває додаткову кількість енергії [2].

Рідина з великою швидкістю з периферії робочого колеса надходить в равликообразний канал, що охоплює робоче колесо. Перетин каналу, що збільшується, сприяє плавному зниженню швидкості рідини, а, отже, переходу частини кінетичної енергії в потенційну, що супроводжується збільшенням тиску (напору).

У відцентрових насосах зі зміною подачі змінюються й інші параметри - напір, споживана потужність і коефіцієнт корисної дії (к.к.д.). Величини, що характеризують роботу відцентрових насосів при постійному числі оборотів, представляються у вигляді графічних залежностей: напору H , потужності $N_{номр}$ й к.к.д. η від подачі рідини Q . Такі залежності називаються характеристиками насоса й установлюються експериментальним шляхом. Схематично вони представлені на рис. 9.1. Як видно з малюнка, зі збільшенням подачі Q потужність $N_{номр}$, споживана насосом, беззупинно росте. При закритій засувці ($Q = 0$) насос споживає мінімальну потужність, що витрачається на подолання тертя в підшипниках і на переміщення рідини робочим колесом у корпусі насоса. Тому, щоб не перевантажувати електродвигун, необхідно пускати насос при закритій засувці.

Устрій експериментальної установки.

Методика проведення експерименту

Схема установки наведена на рис. 9.2. Вода із прийомного бака 23 через відкритий кран 21 надходить у центр робочого колеса відцентрового насоса 20 і нагнітається через регулювальний вентиль 17 у напірний бак 9, звідки надходить у вимірювальну ділянку 13, де встановлений витратомір Вентурі. До вихідного перерізу водоміра приєднана п'єзометрична трубка 32, а до вузького перерізу – 33. П'єзометричні трубки 32 і 33 у верхній частині з'єднані гумовим шлангом і утворюють диференціальний манометр, що вимірює різницю статичних напорів у двох перерізах водоміра. Далі вода через відкритий кран 25 надходить у прийомний бак 23. Для виміру вакууму в усмоктувальних і тиску в нагнітальних патрубках насоса служить вакуумметр 27 і манометр 28. В електричний ланцюг електродвигуна насоса підключений вольтметр 34 і амперметр 35.

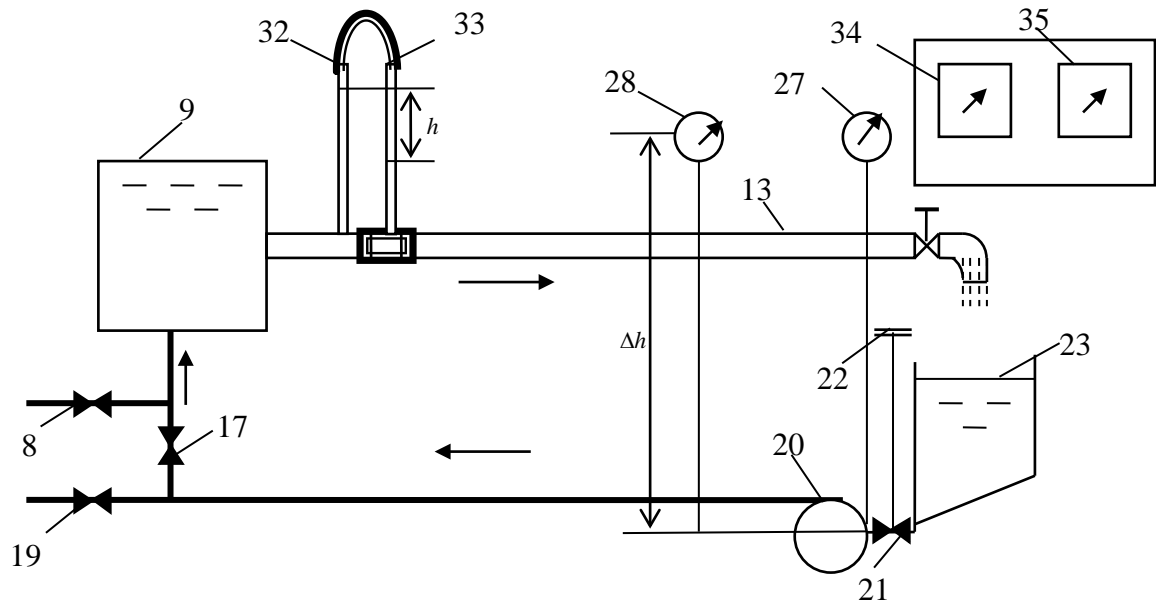


Рис. 9.2 Схема експериментального стенду для випробування насосу

Переналагодження стенда для проведення випробувань відцентрового насоса проводить навчальний майстер. Вентилі 8 і 19 повинні бути закриті, а вентиль 17 – відкритий.

Перед початком роботи перевіряють наявність води в прийомному баку 23, закривають регулювальний вентиль 17 і включають відцентровий насос. При цьому подача його буде дорівнює нулю ($Q = 0$). Записують показання манометра, вакуумметра, амперметра й п'єзометрів 32 і 33.

Повністю відкривають кран 25 і, відкриваючи регулювальний вентиль 17, домагаються зниження напору насоса на $0,1 - 0,2 \text{ кг/см}^2$, спостерігаючи за показаннями манометра. Роблять перераховані вище виміри. Знижують напір ще на $0,1 - 0,2 \text{ кг/см}^2$ і знову повторюють виміри.

Обробка результатів експерименту

Різниця показань п'єзометрів $h = h_1 - h_2$

Подача рідини $Q = C\sqrt{h}$, $\text{м}^3/\text{с}$

Повний напір насоса $H = h_m + h_{\text{вак}} + \Delta h$

де Δh - відстань від осі усмоктувального патрубку насоса до центра манометра, м.

$$\text{Корисна потужність насоса } N_{кор} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{1000}, \text{ кВт}$$

$$\text{Потужність, споживана насосом } N_{номр} = \frac{I \cdot U}{1000} \cos \varphi, \text{ кВт}$$

де I - сила струму, U - напруга, $\cos \varphi = 0,5$.

$$\text{Коефіцієнт корисної дії } \eta = \frac{N_{кор}}{N_{номр}} \cdot 100, \%$$

Всі величини, обмірювані в процесі випробування й одержання розрахунків, заносяться в таблицю.

Роботу з випробування насоса закінчують побудовою характеристик насоса.

| | Найменування величин | Позначення | Розмірність | Номер опиту | | | | | | | | | | |
|---|---|------------|--------------------|-------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|--|
| | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | |
| 1 | Показання манометра | P | кг/см ² | | | | | | | | | | | |
| 2 | Показання вакуумметра | B | мм.рт.ст | | | | | | | | | | | |
| 3 | Напруга | U | В | | | | | | | | | | | |
| 4 | Сила струму | I | А | | | | | | | | | | | |
| 5 | Показання першого п'езометра | h_1 | м | | | | | | | | | | | |
| 6 | Показання другого п'езометра | h_2 | м | | | | | | | | | | | |
| 7 | Різниця показань п'езометрів | h | м | | | | | | | | | | | |
| 8 | Подача насоса | Q | м ³ /с | | | | | | | | | | | |
| 9 | Відстань від точки приєднання вакуумметра до центра манометра | Δh | м | | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | |
|----|-----------------------------|------------|-------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| 10 | Повний напір насоса | H | м | | | | | | | | | | |
| 11 | Корисна потужність насоса | $N_{кор}$ | кВт | | | | | | | | | | |
| 12 | Споживана потужність | $N_{потр}$ | кВт | | | | | | | | | | |
| 13 | Коефіцієнт корисної дії | η | % | | | | | | | | | | |
| 14 | Коефіцієнт витрати водоміра | C | $м^{2,5}/с$ | | | | | | | | | | |

Контрольні питання

1. Як влаштований відцентровий насос? Яке його призначення?
2. У чому полягає принцип дії відцентрового насоса?
3. Що таке манометричний напір насоса?
4. Що таке повний напір насоса?
5. Що враховує величина Δh при розрахунку повного напору насоса?
6. Що таке характеристики відцентрового насоса?
7. Визначте фізичний зміст коефіцієнта корисної дії.
8. Коли варто робити пуск відцентрового насоса – при відкритій або закритій засувці? Відповідь обґрунтувати.
9. Який метод застосовується в даній експериментальній роботі для визначення витрати води?
10. Що являє собою характеристика трубопроводу? Як визначається робоча точка насоса?
11. У чому особливості паралельної й послідовної роботи декількох насосів на один трубопровід?
12. Як визначається гранично припустима висота усмоктування відцентрового насоса?

Лабораторна робота № 10

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОГРАНИЧНОГО ШАРУ НА ПЛОСКІЙ ПЛАСТИНІ

Мета

Вивчення основних понять теорії пограничного шару, ознайомлення з особливостями математичного опису обтікання тіл потоком рідини. Одержання навичок експериментального і розрахунково-теоретичного визначення характеристик пограничного шару.

Завдання

1. Експериментально вимірити розподіл швидкості в заданих перерізах пограничного шару, товщину пограничного шару, товщини витиснення і втрати імпульсу, дотичне напруження на стінці.
2. Визначити характер течії в пограничному шарі.
3. Одержати аналітичний розподіл швидкості й основні характеристики в ламінарному і турбулентному пограничному шарі.
4. Зіставити експериментальні результати з теоретичними.

Теоретичні положення

Якщо в потік рідини з однорідним розподілом швидкості помістити тверде тіло, то через в'язке тертя об його поверхню розподіл швидкості в потоці зміниться. При зіткненні часток рідини з поверхнею тіла через наявність в'язкості вони «прилипають» до неї. У результаті в області біля тіла утвориться тонкий шар загальмованої рідини і весь потік можна розбити на дві області: пограничний шар і зовнішню частину. Пограничний шар - це тонка область потоку рідини, що прилягає до поверхні тіла, що обтікається, у межах якої відбувається основна зміна швидкості потоку від нуля на поверхні (стінці) до значень, близьких до швидкості незбуреного потоку (удалині від тіла). У пограничному шарі внаслідок дії сил в'язкості існують великі градієнти швидкості. В зовнішньому потоці дія в'язкості виявляється слабо, градієнти шви-

дкості настільки малі, що силою в'язкого тертя можна зневажити і рідину вважати ідеальною і застосовувати для опису руху рівняння руху ідеальної рідини (рівняння Ейлера).

Товщиною пограничного шару δ прийнято називати відстань y від стінки до точки, у якій швидкість u відрізняється на 1% від швидкості незбуреного потоку u_∞ (при $y = \delta$: $u = 0.99u_\infty$) [6].

Для опису руху в межах пограничного шару застосовують рівняння нерозривності разом з рівнянням руху реальної рідини (рівняння Нав'є - Стокса) з деякими спрощеннями. Ці спрощення були здійснені Л. Прандтлем і отриману систему рівнянь називають диференціальними рівняннями пограничного шару або рівняннями Прандтля.

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = u_\infty \frac{\partial u_\infty}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}, \quad (1) \quad \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

Інтегруючи рівняння (1) по товщині пограничного шару, одержують інтегральне рівняння пограничного шару або рівняння Кармана, що відображає закон збереження кількості руху стосовно до пограничного шару. Це рівняння має вид:

$$\frac{d\delta_{**}}{dx} + \frac{du_\infty}{dx} \cdot \frac{\delta_{**}}{u_\infty} \left(2 + \frac{\delta_*}{\delta_{**}} \right) = \frac{\tau_o}{\rho u_\infty^2} \quad (2)$$

У рівняння (2) входять умовні товщини:

- товщина витиснення δ_* , що характеризує зменшення витрати рідини через переріз пограничного шару внаслідок дії сил в'язкості в порівнянні з зовнішнім рухом;
- товщина втрати імпульсу δ_{**} , що характеризує відповідне зменшення кількості руху.

Для нестисливої рідини

$$\delta_* = \int_0^\delta \left(1 - \frac{u}{u_\infty} \right) dy, \quad (3)$$

$$\delta_{**} = \int_0^\delta \frac{u}{u_\infty} \left(1 - \frac{u}{u_\infty} \right) dy, \quad (4)$$

Важливою характеристикою пограничного шару, істотної для розрахунку силової взаємодії рідини з обтічним тілом, є дотичне напруження на стінці τ_o .

Рух у пограничному шарі може бути ламінарним і турбулентним. Для пограничного шару число Рейнольдса визначається по формулі $Re_x = \frac{\rho u_\infty x}{\mu}$,

де x – відстань від початкової точки обтічної поверхні до даного перерізу.

При малих числах Рейнольдса, менших критичного значення

$Re_x < Re_{x_{кр}} (x < x_{кр})$ пограничний шар є ламінарним; при $Re_x > Re_{x_{кр}} (x > x_{кр})$ пограничний шар турбулізується.

Величина $Re_{x_{кр}}$ залежить від шорсткості поверхні, умов обтікання, ступеня турбулентності потоку і може мінатися в широких межах. У середньому можна прийняти $Re_{x_{кр}} = 10^5$.

Товщина пограничного шару наростає по довжині пластини; для ламінарного пограничного шару $\delta \approx x^{0.5}$, для турбулентного - $\delta \approx x^{0.8}$. Дотичне напруження по довжині убуває: для ламінарного пограничного шару $\tau_o \approx x^{-0.5}$, після турбулізації пограничного шару τ_o різко зростає, після чого убуває повільніше, $\tau_o \approx x^{-0.2}$.

При ламінарному режимі руху швидкість у пограничному шарі розподіляється за параболічним законом:

$$\frac{u}{u_o} = 1,5 \left(\frac{y}{\delta} \right) - 0,5 \left(\frac{y}{\delta} \right)^3 \quad (5)$$

При турбулентному режимі руху у випадку не дуже великих значень Re_x – за ступеневим законом:

$$\frac{u}{u_\infty} = \left(\frac{y}{\delta} \right)^{1/7} \quad (6)$$

Профіль швидкості в цьому випадку відрізняється більшою крутизною і наповненістю. Характер зміни δ і τ_0 по довжині пластини представлений на рис.10.1. Тут же показаний характер розподілу швидкості для ламінарного і турбулентного пограничного шару.

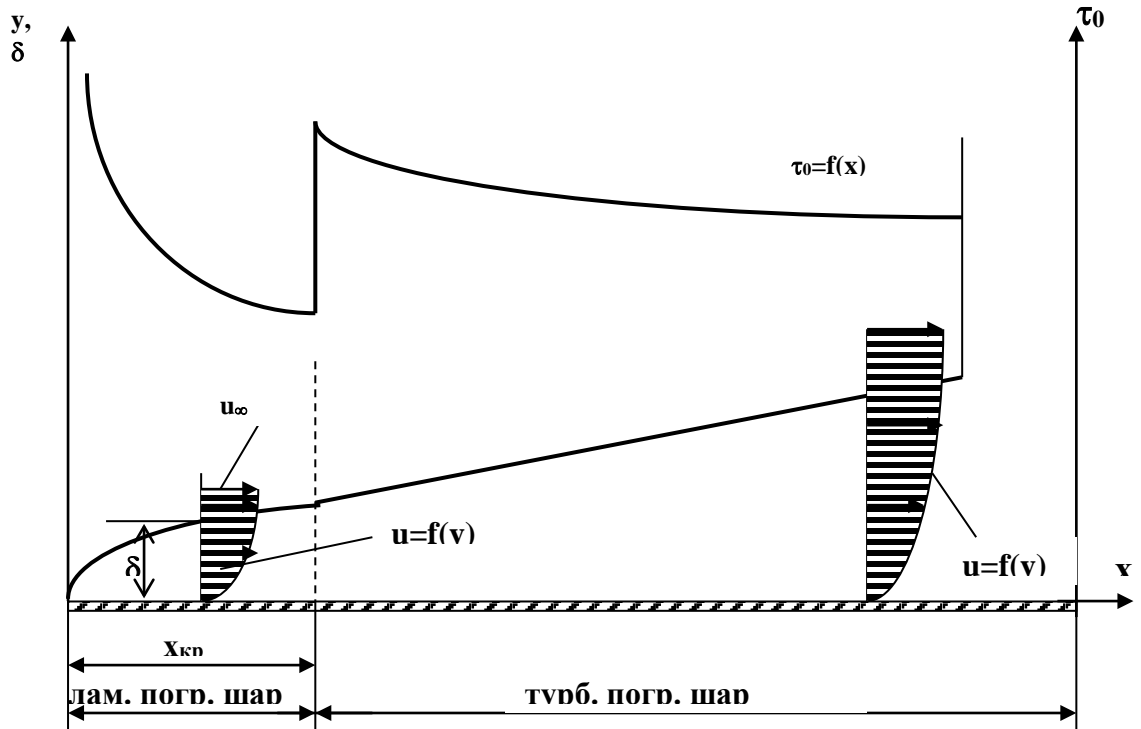


Рис.10.1 Зміна основних характеристик пограничного шару по довжині пластини

Для ламінарного пограничного шару на плоскій пластині існують наступні розрахункові формули для визначення основних характеристик:

$$\delta = \frac{4,9 \cdot x}{\text{Re}_x^{0,5}} \quad (7)$$

$$\delta_* = 0,346 \cdot \delta \quad (8)$$

$$\delta_{**} = 0,133 \cdot \delta \quad (9)$$

$$\tau_0 = 0,664 \frac{\rho u_\infty^2}{2} \text{Re}^{-0,5} \quad (10)$$

Якщо $Re_x \gg Re_{кр}$, можна при проведенні розрахунку прийняти, що пограничний шар із самого початку пластини турбулентний. У цьому випадку теоретично отримано:

$$\delta = \frac{0,37 \cdot x}{Re_x^{0,2}} \quad (11)$$

$$\delta_* = \frac{1}{8} \delta \quad (12)$$

$$\delta_{**} = \frac{7}{72} \delta \quad (13)$$

$$\tau_o = 0,0578 \frac{\rho u_\infty^2}{2} \cdot Re_x^{-0,2} \quad (14)$$

Устрій експериментального стенду

Установка (рис.10.2) зібрана на базі аеродинамічної труби розімкнутого типу, що приєднана до усмоктувального патрубку 1 вентилятора 2. Труба складається з вихідної ділянки 3, робочої ділянки 4 і вхідної ділянки 5. Робоча ділянка прямокутного перерізу виконана із прозорого органічного скла, має габарити 0,5x0,15x0,085 м. Посередині робочої ділянки встановлена досліджувана пластина 6 довжиною $L=0,5$ м і шириною 0,085 м, товщина пластини $1,5 \times 10^{-3}$ м. Розподіл швидкості в пограничному шарі вимірюється за допомогою трубки Піто 7, виготовленої з нержавіючого капіляра діаметром $d=3 \times 10^{-4}$ м. Трубка переміщається в поперечному напрямку координатником 8. Відстань y від стінки до центра носика трубки Піто визначається по шкалі ноніусом. Початкове положення трубки визначається візуально; у момент торкання трубкою поверхні пластини на відстані до центра носика $y=d/2=1,5 \times 10^{-4}$ м. За допомогою спеціального пристрою пластина може переміщатися щодо носика трубки Піто, що дозволяє вимірити розподіл швидкості в різних перерізах. У робочій ділянці є датчик статичного тиску (отвір у стінці), передній обріз трубки Піто розташовується в тім же перерізі, як і датчик статичного тиску.

Різниця повного P_0 і статичного P , тобто динамічний тиск P_d , вимірюється п'єзометрами 9, один із яких з'єднаний із трубкою Піто, а інший з датчиком статичного тиску. Швидкість повітря регулюється засувкою 1.

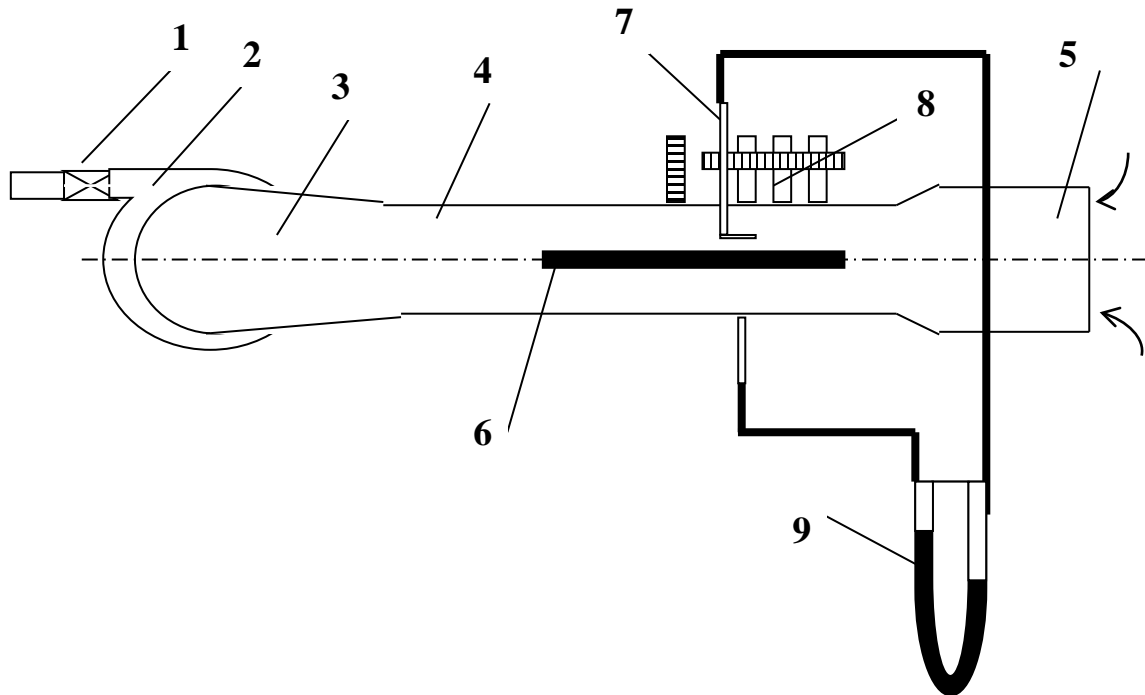


Рис.10.2

Схема експериментальної установки

1– засувка; 2 – вентилятор; 3– вихідна ділянка; 4– робоча ділянка; 5– вхідна ділянка; 6 – пластина; 7 – трубка Піто; 8 – координатник; 9 – п'єзометри

Методика проведення експерименту

Пластину в робочій ділянці встановлюють так, щоб її передній край знаходилася на заданому викладачем відстані x від трубки Піто. За допомогою координатника трубка Піто наближується до контакту з пластиною. Включається вентилятор і засувкою встановлюється задана викладачем швидкість повітря. Після усталення показання п'єзометрів вимірюють різницю їх показань $\ell_{\text{изм}}$. Далі координатником переміщують трубку Піто від пластини на заданий крок Δy , що відлічується по шкалі. У новому положенні $y_2 = y_1 + \Delta y$ повторюють виміру. Переміщуючи трубку, проводять виміри доти, поки три останніх показання не збіжаться (тобто носик трубки вийде за межі пограни-

чного шару). У пристінній області, де швидкість зростає різко, крок переміщення Δy повинний бути невеликим, порядку $2,5 \times 10^{-4}$ м, у міру віддалення від пластини крок можна збільшувати. Відстань від пластини визначається щораз як $y_i = y_{i-1} + \Delta y$. Величини y_i і відповідні їм $l_{вим.i}$ записуються в таблицю 1. У цю же таблицю заносять надалі результати обробки експериментальних даних і деякі теоретичні розрахунки. У процесі досліду записують відстані від початку пластини x , атмосферний тиск B (мм рт. ст.) і температуру повітря $t_{o.c.}$.

Таблиця 1

| № | $y_i \times 10^3$ м | $\frac{y_i}{\delta}$ | $l_{вим.i}$ м | $P_{ді}$ Па | u_i м/с | $\frac{u_i}{u_\infty}$ | $1 - \frac{u_i}{u_\infty}$ | $\frac{u_i}{u_\infty} \cdot \left(1 - \frac{u_i}{u_\infty}\right)$ | $\left(\frac{u_i}{u_\infty}\right)^{теор}$ лам | $\left(\frac{u_i}{u_\infty}\right)^{теор}$ тур |
|-----|------------------------|----------------------|------------------|----------------|--------------|------------------------|----------------------------|--|---|---|
| 1 | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | |
| ... | | | | | | | | | | |
| i | | | | | | | | | | |
| ... | | | | | | | | | | |
| n | | | | | | | | | | |

Обробка результатів експерименту

1. Визначають атмосферний тиск

$$P_a = 133,3 \cdot B, \quad \text{Па}$$

де B – показання барометру, мм.рт.ст.

2. Визначають густину повітря

$$\rho = \frac{P_a}{R_{возд} (273 + t_{o.c.})}, \quad \text{кг/м}^3$$

$$R_{возд} = 287 \text{ Дж / (кг} \cdot \text{град)}$$

3. Визначають динамічний тиск

$$P_{ді} = 9,81 \cdot \rho_g \cdot l_{вим.i}, \quad \text{Па}$$

ρ_g – густина води

4. Визначають швидкість повітря

$$u_i = \sqrt{\frac{2P_{\partial i}}{\rho}}, \quad \text{м/с}$$

Величини $P_{\partial i}$ і u_i заносять у таблицю. Будують графіки залежності $U = f(y)$ (рис. 10.3)

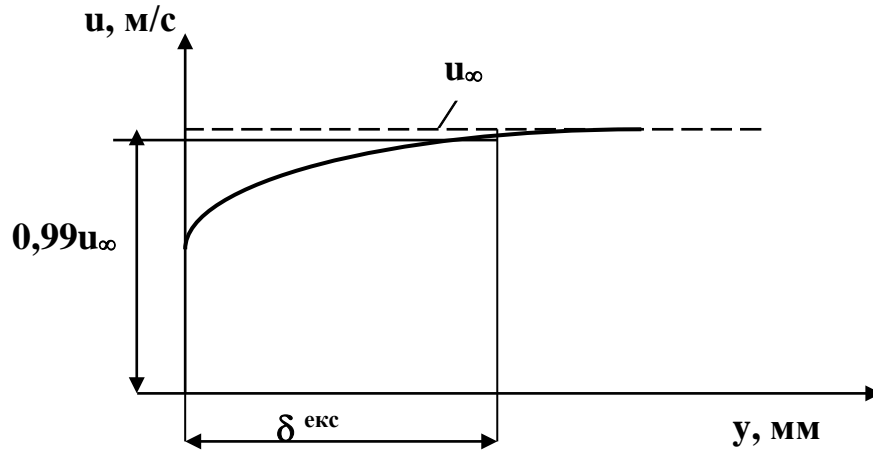


Рис. 10.3 Графік залежності $u=f(y)$

5. Найбільші що не змінюються значення швидкості приймають за u_{∞} . Визначають величину $0,99 u_{\infty}$, відкладають її на осі ординат графіка $u = f(y)$ і відповідні цій величині значення y приймають за $\delta^{\text{екс}}$ (на підставі визначення поняття товщини пограничного шару).

6. Визначають безрозмірні величини $\frac{y_i}{\delta}$ і $\frac{u_i}{u_{\infty}}$ (результати записують у таблицю 1 і будують графіки залежності $\frac{u}{u_{\infty}} = f\left(\frac{y}{\delta}\right)$ (рис. 10.4).

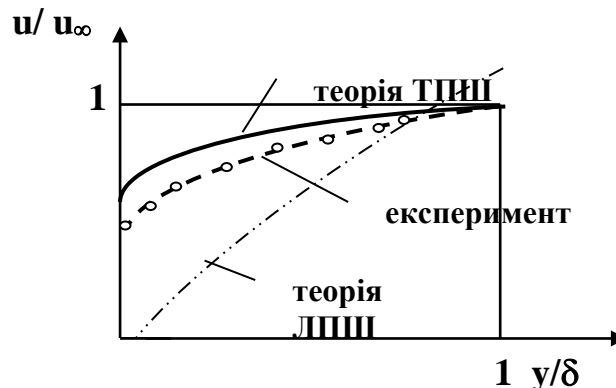


Рис. 10.4 Графік залежності $u/u_{\infty} = f(y/\delta)$

ТПШ – турбулентний пограничний шар, ЛПШ – ламінарний пограничний шар

7. Визначають комплекси $1 - \frac{u_i}{u_\infty}$ і $\frac{u_i}{u_\infty} \left(1 - \frac{u_i}{u_\infty}\right)$, заносять результати в таблицю.

8. Визначають експериментальні значення δ_* і δ_{**} відповідно до формул (3), (4), представленими в кінцево-різницевого виді (інтеграли замінені сумами) для вимірів у поперечному напрямку до пластини :

$$\delta_*^{експ} = \sum_{i=1}^n \frac{\left(1 - \frac{u_{i-1}}{u_\infty}\right) + \left(1 - \frac{u_i}{u_\infty}\right)}{2} \cdot (y_i - y_{i-1}),$$

$$\delta_{**}^{експ} = \sum_{i=1}^n \frac{\left[\frac{u_{i-1}}{u_\infty} \left(1 - \frac{u_{i-1}}{u_\infty}\right)\right] + \left[\frac{u_i}{u_\infty} \left(1 - \frac{u_i}{u_\infty}\right)\right]}{2} \cdot (y_i - y_{i-1});$$

При розрахунку по цих формулах варто мати на увазі, що швидкість на стінці дорівнює 0, отже при $i = 1, y_{i-1} = 0, u_{i-1} = 0$ і $\frac{u_{i-1}}{u_\infty} = 0$

9. Використовуючи результати експериментального визначення δ_{**} в прилеглому перерізі x_2 (отриманою іншою бригадою студентів), визначають експериментальне значення дотичного напруження на стінці

$$\tau_o^{експ} = \rho u_\infty^2 \frac{\delta_{**1}^{експ} - \delta_{**2}^{експ}}{x_1 - x_2}$$

Ця формула отримана як результат кінцево-різницевого подання рівняння Кармана в припущенні, що швидкість u_∞ уздовж пластини незмінна, тобто

$$\frac{du_\infty}{dx} = 0.$$

Тут індекс 1 - означає переріз, у якому отримані власний досвідчений дані, індекс 2 - сусіднє значення. Отримані значення τ_o повинні бути

$$\text{віднесені до перерізу } \bar{x} = \frac{x_1 + x_2}{2}$$

10. Визначають числа Рейнольдса: $Re_x = \frac{\rho u_\infty x}{\mu}$ - по локальній координаті x , $Re_{\bar{x}} = \frac{\rho u_\infty \bar{x}}{\mu}$ - за середнім значенням \bar{x} .

В'язкість μ визначають по таблицях у залежності від температури повітря.

11. Визначають теоретичні значення $\delta^{теор}$, $\delta_*^{теор}$, $\delta_{**}^{теор}$, $\tau_0^{теор}$ по формулах (7) ÷ (14). $\delta^{теор}$, $\delta_*^{теор}$, $\delta_{**}^{теор}$ розраховують по локальній координаті x , $\tau_0^{теор}$ розраховують по \bar{x} . При розрахунку $\delta_*^{теор}$, $\delta_{**}^{теор}$ у формули (8), (9), (12), (13) замість δ підставляють $\delta^{теор}$.

12. Визначають теоретичні значення $\left(\frac{u}{u_\infty}\right)^{теор}$ по формулах (5) і (6), результати заносять у таблицю 1. Будують відповідні графіки (рис.10.4)

13. На основі порівняння експериментальної і теоретичних кривих розподілу безрозмірної швидкості, а також за значенням числа Re_x визначають режим руху в пограничному шарі.

Основні результати експерименту і теоретичних розрахунків зводять у таблицю 2

Таблиця 2

| | | $\delta, мм$ | $\delta_*, мм$ | $\delta_{**}, мм$ | $\tau_0, Па$ |
|-------------|-------------|--------------|----------------|-------------------|--------------|
| Експеримент | | | | | |
| Теорія | Лам. режим | | | | |
| | Турб. режим | | | | |

Контрольні питання

1. Що таке пограничний шар, які його основні характеристики?
2. Що таке товщина пограничного шару, товщина витиснення і товщина втрати імпульсу?

3. Як визначити режим течії в пограничному шарі? Які основні відмінності ламінарного і турбулентного пограничного шару?
4. Від яких факторів і як залежить товщина пограничного шару і дотичне напруження на стінці?
5. Які основні теоретичні співвідношення для розрахунку товщини пограничного шару, товщини витиснення і втрати імпульсу, дотичного напруження на стінці?
6. Який устрій експериментальної установки?
7. Як експериментально визначається розподіл швидкості в пограничному шарі?
8. Як експериментально визначаються $\delta, \delta_*, \delta_{**}, \tau_o$?

Список літератури

1. Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу „Гидравлика и гидравлические машины” Одесса, Одесский технологический институт холодильной промышленности. – 1985.
2. О.М. Грабовський, О.М. Цабієв. Гідравліка і нагнітачі. Київ, НМК ВО. 1992..
3. Ю.М. Константинов, О.О. Гіжа. Технічна механіка рідини і газу. Київ, Вища школа, 2002.
4. Е.І. Альтман, І.Л. Бошкова. Гідрогазодинаміка. Конспект лекцій. Одеса, Одеська державна академія холоду, 2008.
5. И.Е. Идельчик Справочное пособие по гидравлическим сопротивлениям. М., 1975.
6. С.Г. Лойцянский. Механика жидкости и газа. М., Наука, 1986.
7. Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу „Гидромеханика и газодинамика” Одесса, Одесский технологический институт холодильной промышленности. – 1983.
8. Дейч М.Е., Зарянкин А.Е. Гидрогазодинамика – М., Энергоатомиздат, 1984.
9. Гиргидов А.Д. Механика жидкости и газа (гидравлика) – СПб, Изд-во Политехн. ун-та, 2007.