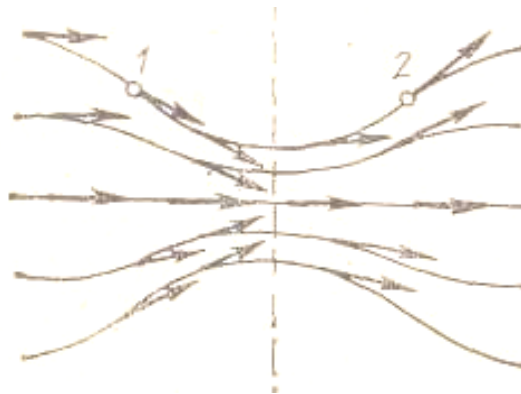


Міністерство освіти і науки України
Мирогощанський аграрний фаховий коледж



**Методичні
рекомендації
з дисципліни
«Основи теплотехніки і гідравліки»**

Тема : Основи гідродинаміки.

Тема: Основні положення гідродинаміки.

План лекції:

1. Завдання гідродинаміки.
2. Гідравлічні характеристики потоку рідини. Змочений периметр, живий переріз, витрата і середня швидкість потоку рідини.
3. Рівняння Бернуллі для елементарної струминки ідеальної і реальної рідини, потоку реальної рідини.
4. Режими руху рідини. Число Рейнольдса, його критичне значення.
5. Види гідравлічних опорів і втрат напору.
6. Визначення втрат напору на тертя в середині рідини і на подолання місцевих опорів.
7. Гідравлічний удар у трубах.

Мета: засвоїти основні положення гідродинаміки.

Метод: лекція – пояснення з елементами бесіди.

Матеріальне забезпечення: методичні рекомендації до вивчення даної теми, плакати, підручник.

Використана література:

1. Черняк О.В., Рибчинська Г.Б. **Основи теплотехніки і гідравліки.** - Київ: Вища школа, 1982р.-223с.
2. Дідур В.А., Савченко О.Д., Журавель Д.П., Мовчан С.І. **Гідравліка та її використання в агропромисловому комплексі.** Підручник. - 2008.-577с.
3. Драганов Б.Х., Міщенко А.В., Борхаленко Ю.О., **Основи теплотехніки і гідравліки:** Навчальний посібник /За ред. Б.Х. Драганова. - Київ.: Аграрна освіта, 2010. – 495 с.

Завдання гідродинаміки

У гідродинаміці розглядають закони руху рідини в трубах, каналах і пористих тілах, а також питання обтікання тіл рідиною.

Рух рідини істотно відрізняється від руху твердого тіла. Як відомо з механіки, рух твердого тіла можна уявити у вигляді суми двох рухів: поступального і обертального. При цьому відстань між двома будь-якими точками залишається незмінною. На відміну від твердого тіла відстань між частинками рідини не зберігається в процесі руху. Переміщення досить малого Об'єму рідини можна уявити у вигляді суми трьох рухів: поступального і обертального всього об'єму в цілому, а також переміщення різних частинок об'єму одна відносно одної.

Отже, відмітною і найістотношою особливістю рідини є здатність її частинок переміщуватися одна відносно одної.

Рідина, що рухається, як і та, що перебуває в спокої, зазнає дії зовнішніх масових сил. До того ж у рідині, що рухається, слід враховувати ще й сили тертя (в'язкість рідини).

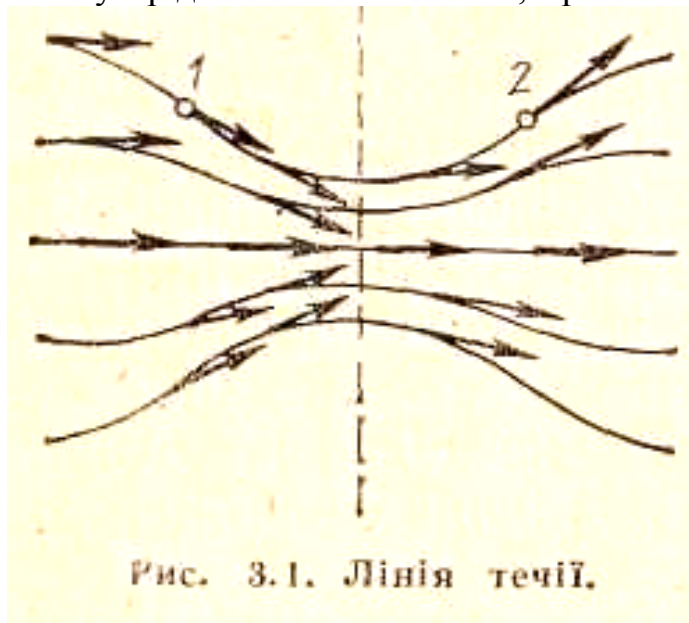
Величинами, які характеризують рідину, що рухається, є швидкість течії і тиск.

Основне завдання гідродинаміки — встановити взаємозв'язок між ними при заданій системі зовнішніх сил, які діють на масу рідини, що рухається.

Елементарна струминка. Основним елементом гідралічної моделі потоку є елементарна струминка. Проте, перш ніж визначити її, введемо кілька понять.

Коли виділений об'єм рідини настільки малий, що можна знехтувати зміною його форми, то його називають рідкою частинкою. Крива, яку описує рідка частинка в своєму русі, називається траєкторією рідкої частинки.

Рух рідини можна описати, простеживши за рухом кожної частинки; проте



звичайно цей спосіб не застосовують. Коли в кожний момент часу відомо вектор швидкості рідких частинок у кожній точці об'єму рідини, що рухається, то розуміють, що задано поле швидкостей рідини. Якщо відомо розподіл (тобто поле) швидкостей потоку і залежність цього розподілу від часу, то рух рідини буде повністю визначений. Напрямок швидкостей у потоці характеризується так званими лініями течії.

Лінією течії називають уявну криву, проведену в рідині так, що кожна

частинка рідини, яка міститься на ній у певний момент часу, має швидкість, що збігається за напрямом з дотичною до цієї кривої.

Така умовно прийнята лінія течії на відміну від траєкторії об'єднує безліч частинок рідини в певний момент часу.

Коли під час руху рідини поле швидкостей не змінюється з часом, то такий рух називають **усталеним**, або **стаціонарним**.

В усталеному русі кожна частинка в будь-якій точці простору має ту саму швидкість, яку мали в цій точці всі попередні частинки і матимуть усі наступні. Коли поле швидкостей рідини змінюється з часом, то рух називають **неусталеним**, або **нестационарним**. Лінії течії при цьому не збігаються з траєкторіями рідких частинок. Справді, дотичні до лінії течії дають напрям швидкості різних частинок, які перебувають у цей час у різних точках, наприклад у точках 1 і 2 (рис. 3.1). Проте дотичними до траєкторії рідкої частинки є швидкості тієї самої частинки, але в різні моменти часу. На рис. 3.1 цьому відповідають два положення однієї частинки спочатку в точці 1, а потім у точці 2. Коли розподіл швидкостей у потоці змінюється з часом, то за час, поки одна частинка дійде від точки 1 до точки 2, швидкість у точці 2 може змінитися.

З наведеного міркування, виходить, що в усталеному потоці лінії течії збігаються, з траєкторіями рідких частинок. Прикладом усталеного руху може бути процес витікання рідини з отвору в стінці посудини (рис. 3.2, а) за умови, що рівень рідини в посудині весь час залишається незмінним. Прикладом неусталеного руху є той самий процес витікання рідини з отвору в стінці посудини (рис. 3.2, б), якщо при цьому рівень рідини в посудині змінюється з часом.

Проведемо умовно лінію течії через кожну точку малого замкненого контура c , виділеного в рідині (рис. 3.3). Утворену трубчасту поверхню називають **трубкою течії**. Оскільки дотичні до ліній течії дають напрям швидкостей частинок, то частинки ніколи не залишають трубки течії, де вони перебувають. Рідина, яка заповнює трубку течії, утворює елементарну струминку. При стаціонарному витіканні форма елементарних струминок не змінюється, оскільки не змінюється форма ліній течії. Площу перерізу елементарної струминки, напрямлену нормально до ліній течії, називають **живим перерізом**, або просто **перерізом струминки**, і позначають через A . Різні величини, що характеризують витікання елементарних струминок є досить важливими, оскільки вони дають точний диференціальний (не усереднений) опис руху. Такими величинами є швидкість і елементарні витрати рідини в струминці. Оскільки живий переріз струминки досить малий, швидкості рідини в різних точках перерізу можна вважати однаковими між собою і називати швидкістю *рідини в струминці*, позначаючи цю швидкість через v .

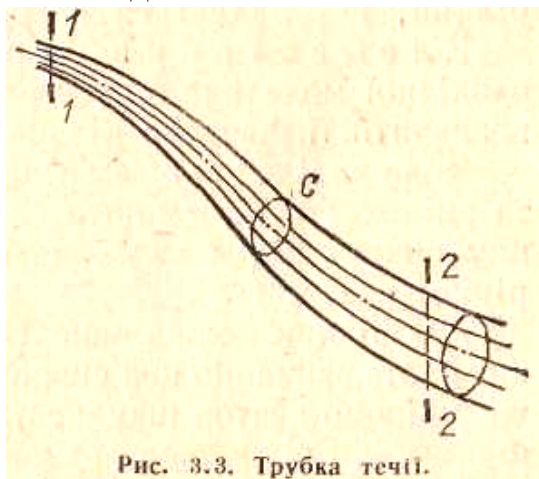


Рис. 3.3. Трубка течії.

Елементарною об'ємною витратою (або масовою витратою) називають об'єм (чи масу) рідини, що протікає через переріз струминки за одиницю часу. Одиниця масової витрати — кілограм за секунду (кг/с); одиниця об'ємної витрати — кубічний метр за секунду (м³/с)..

Якщо позначити елементарну об'ємну витрату через q , а масову — через m , то

залежність між ними можна подати рівністю

$$m = q\rho, \quad (3.1)$$

де ρ — густина рідини в перерізі елементарної струминки.

Розглянемо рух нестисливої рідини в елементарній струминці. Оскільки частинки рідини не залишають струминки і рідина нестислива то елементарні об'ємні витрати в будь-яких двох перерізах струминки, наприклад у перерізах 1—1 та 2—2 (рис. 3.3), мають бути однаковими між собою в кожний момент часу:

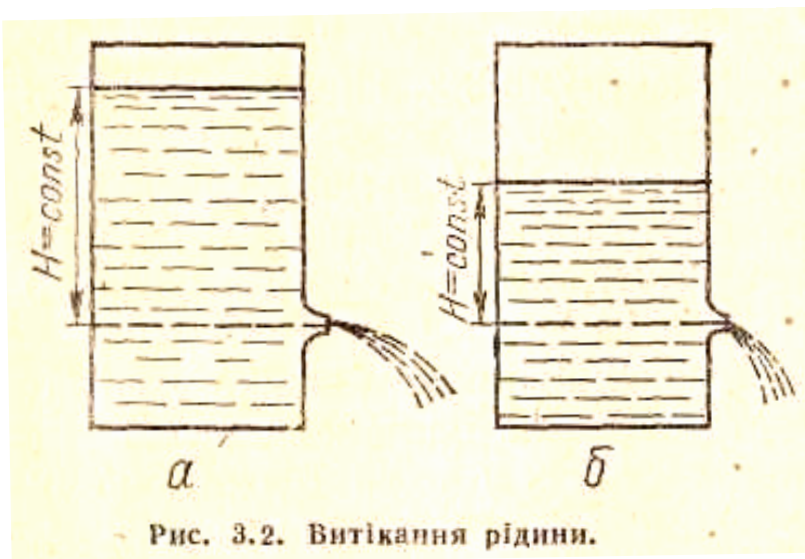


Рис. 3.2. Витікання рідини.

$$q_1 = q_2 \quad (3.2)$$

Крім того, елементарна об'ємна витрата рідини в перерізі, площа якого A , дорівнює

$$q = Av. \quad (3.3)$$

Справді, за 1 с частинки рідини проходять шлях, який чисельно дорівнює v , отже, vA — об'єм циліндра висотою v і основою A , а саме цей об'єм проходить через 1 с переріз струминки. З формул (3.2) та (3.3) дістаємо рівність

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 = vA = \text{const.} \quad (3.4)$$

Рівняння (3.2) та (3.4) називають рівняннями нерозривності струминки.

Потік. У задачах гідродинаміки звичайно розглядають обмежені потоки. Межами потоків при цьому є тверді стінки труб, каналів, відкрита поверхня рідини, а також поверхні тіл, що їх обтікає потік (рис. 3.4).

Потік можна розглядати умовно як пучок елементарних струминок. Тому і для всього потоку вводяться поняття, аналогічні тим, які введено для елементарних струминок. При цьому величини, аналогічні розглянутим, позначимо тими самими буквами, але з відповідними індексами. Так, **живим перерізом потоку називають** переріз, нормальний до загального напрямку руху рідини. Площа A_{Π} живого перерізу потоку дорівнює сумі площ живих перерізів складових його елементарних струминок:

$$A_{\Pi} = \sum A.$$

Витратою потоку (об'ємною Q чи масовою M) називають об'єм чи масу рідини, що протікає через живий переріз потоку за одиницю часу. Аналогічно з формулою (3.1) маємо

$$M = Q\rho.$$

Слід зазначити, що в формулі (3.1) ρ є «місцеве» (в малому перерізі) значення густини. Проте в формулі (3.5) ρ є *середня*

густина у «великому» перерізі потоку. Відмінність у густині за перерізом потоку може бути зумовлена різними причинами, наприклад різними температурами в кожній точці потоку (течія розплавленого металу, рух рідини в теплообмінниках тощо).

Щоб визначити об'ємну витрату потоку, треба ввести поняття *середньої швидкості потоку*. Потік, що проходить по руслу, обмеженому стінками, в різних точках поперечного перерізу має відповідно різні швидкості. Частинки рідини, які стикаються зі стінками труби (русла, каналу), прилипають до стінок і залишаються нерухомими. Швидкість цих частинок дорівнює нулю. Струминки, що протікають безпосередньо близько до прилиплих частинок, внаслідок внутрішнього тертя в рідині гальмуються й зменшують свою швидкість. З віддаленням струминок рідини від стінок їхня швидкість зростає й на осі потоку,

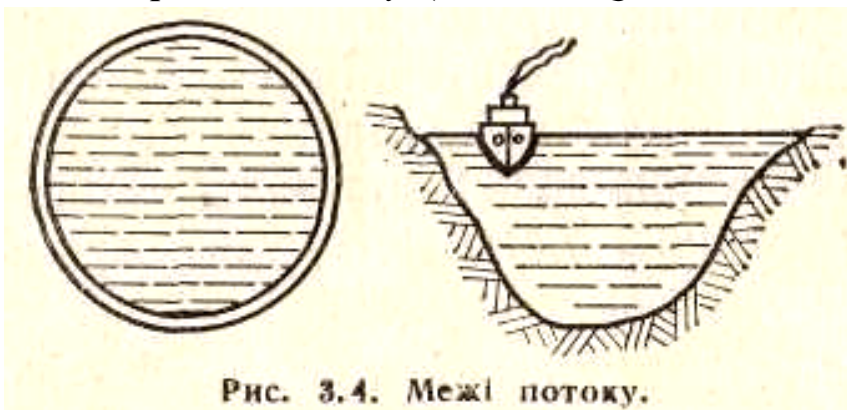


Рис. 3.4. Межі потоку.

тобто в центрі труби (русла, каналу), набуває максимального значення. Цю швидкість називають *осьовою*.

Швидкість елементарних струминок потоку, які проходять між стінками і віссю, змінюється в межах від нуля до максимальної *осьової* швидкості.

Для спрощення вводять **середню швидкість потоку** v , яку визначають так:

$$v = Q/A. \quad (3.6)$$

Звідки об'ємна витрата потоку дорівнює

$$Q = vA. \quad (3.7)$$

Слід чітко усвідомити, що в рівності (3.6) v — середня швидкість потоку, тоді як у рівності (3.3) v — точна (дійсна) швидкість елементарної струминки.

Так само, як і для струминки, для потоку нестисливої рідини справедливе рівняння нерозривності. При будь-якій течії два будь-які об'єми рідини, що проходять у той самий момент часу через довільні перерізи 1—1 та 2—2 потоку (див. рис. 3.3), дорівнюють один одному:

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 = Q. \quad (3.8)$$

Коли ж течія рідини стаціонарна, то для будь-якого моменту часу

$$vA = \text{const.} \quad (3.9)$$

З рівняння (3.8) виходить, що швидкість обернено пропорційна живому перерізу потоку

$$v_1/v_2 = A_2/A_1 \quad (3.10)$$

Це явище добре ілюструється: швидкість течії річок у вузьких місцях підвищується.

Однією з величин, яка характеризує геометрію потоку, є так званий **змочений периметр**.

Змоченим периметром π називають довжину тієї частини межі живого перерізу, по якій потік стикається з обмежувальними стінками. На рис. 3.5 змочений периметр виділено жирними лініями.

Коли геометричний периметр того самого перерізу позначити через π' , то завжди $\pi \leq \pi'$.

На рис. 3.5, *а* змочений периметр збігається з геометричним, оскільки рідина з усіх боків обмежена твердими стінками. На рис. 3.5, *б* змочений периметр менший від геометричного на довжину лінії вільної поверхні рідини. Якщо геометричний периметр на цьому рисунку дорівнює $2/h + 2b$, то змочений периметр дорівнює $2/h + b$.

Відношення площі A живого перерізу до змоченого периметра я називають **гідравлічним радіусом перерізу**:

$$R = A/\pi.$$

Не слід плутати гідравлічний радіус з геометричним. Поняття гідравлічного радіуса має зміст для будь-якого потоку, обмеженого стінками. Щодо геометричного радіуса потоку, то він існує тільки за умови проходження рідини всередині круглої труби. Проте навіть і в цьому разі геометричний радіус не збігається з гідравлічним. Справді, геометричний радіус $r = d/2$, а гідравлічний

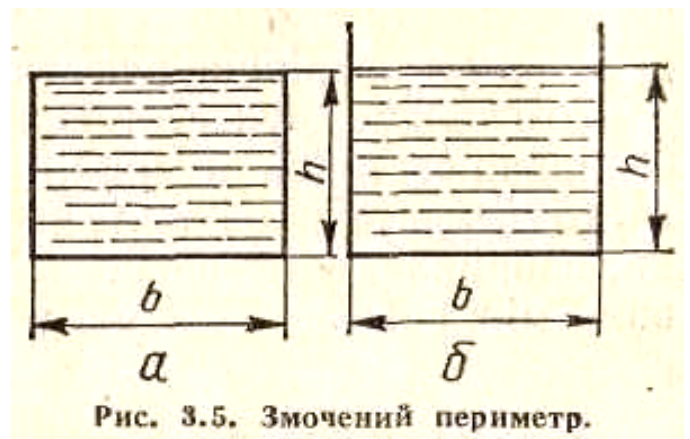


Рис. 3.5. Змочений периметр.

$$R = nd^2/(4nd) = d/4 \neq r.$$

Для каналу прямокутного перерізу (рис. 3.5) гідравлічний радіус

$$R = bh/[2(b + h)] \text{ і } R = hh/(b + 2h)$$

(для випадків a і b відповідно).

Два режими течії рідини.

В кінці XIX ст. англійський фізик Осборн Рейнольдс за допомогою розробленого ним методу забарвлених струмин встановив, що є два режими течії рідини: *ламінальний і турбулентний*.

На рис. 3.6, *а* наведено принципову схему досліду Рейнольдса. Резервуар 2

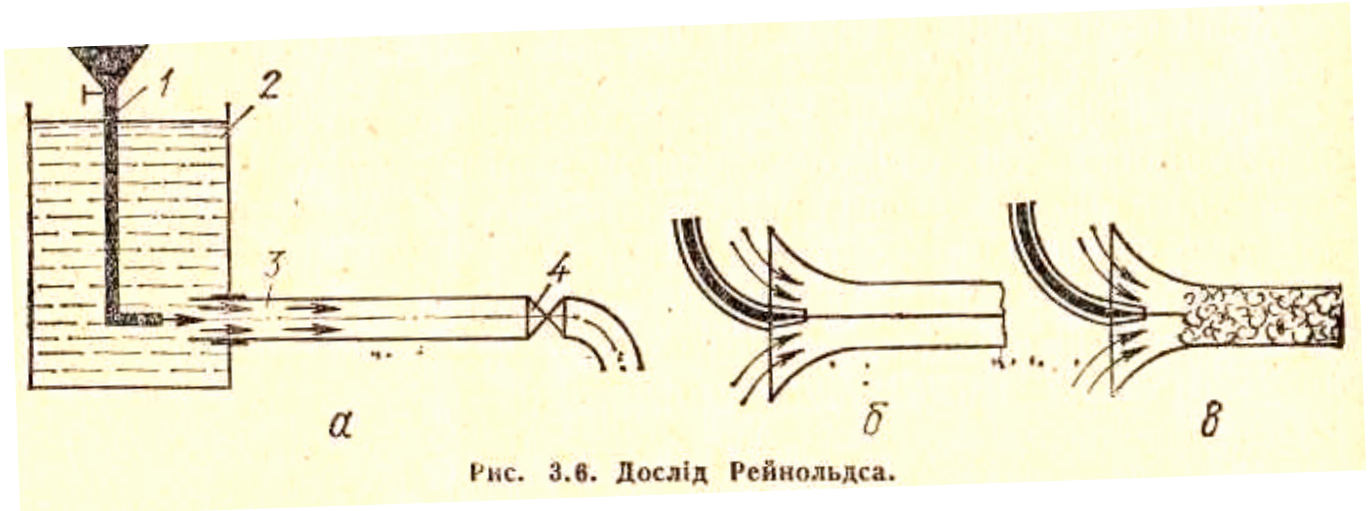


Рис. 3.6. Дослід Рейнольдса.

заповнений рідиною, рівень якої підтримується сталим. До резервуара приєднано скляну трубку 3 з краном 4, що регулює швидкість руху рідини. Щоб спостерігати за характером потоку в трубі 5, в неї по трубці 1 вводять забарвлену рідину з тими самими фізичними властивостями, що й у посудині. При цьому швидкість руху забарвленої струминки має бути близькою до швидкості потоку в трубі 3.

При невеликих швидкостях потоку в трубі 3 забарвлена струминка рухається, не змішуючись з основною масою рідини, у вигляді яскраво вираженої тонкої нитки (рис. 3.6, *б*). При цьому потік стало рухається в трубі паралельними струминками або шарами, що не змішуються. Такий рух рідини, коли можливе існування стаціонарних траєкторій її частинок, називають *ламінальним*, або *шаруватим*.

Із збільшенням швидкості потоку вище від певного значення течія рідини в трубі стрибкоподібно змінює свій характер. При цьому забарвлена струминка втрачає форму прямої нитки, набуває хвиляподібних обрисів і, зрештою, повністю розмивається. Рух стає безладним і потік весь час перемішується (рис. 3.6, *в*).

Рух рідини, коли хаотично змінюються в часі траєкторії частинок і в потоці виникають нерегулярні пульсації швидкості, тиску та інших параметрів, називають *турбулентним рухом*.

Рейнольдс у своїх дослідях змінював не лише швидкість, а й діаметр трубопроводу і в'язкість рідин (підігріванням чи охолодженням їх). При цьому він встановив, що ламінальний режим легше здійснити, якщо:

- 1) менша швидкість руху рідини v ;
- 2) менший діаметр труби d , по якій проходить рідина,

3) більша динамічна в'язкість рідини μ ,

4) менша її густина ρ .

Турбулентному режиму відповідають:

1) більші швидкості руху рідини,

2) більші діаметри труб,

3) більша її густина

4) мала в'язкість.

З перелічених змінюваних величин (v , d , μ і ρ) Рейнольдс залишив безрозмірний комплекс

$$Re = v d \rho / \mu, \quad (3.11)$$

який є дуже важливою динамічною характеристикою руху в'язкої рідини.

Величину Re називають *числом Рейнольдса*.

Коли ввести кінематичну в'язкість $\nu = \mu / \rho$, то формула (3.11), набере вигляду

$$Re = v d / \nu. \quad (3.12)$$

Виразивши діаметр трубки d через гідравлічний радіус ($d = 4R$), дістанемо

$$Re = 4 v R / \nu. \quad (3.13)$$

За формулою (3.13) можна обчислити число Рейнольдса для потоку будь-якого перерізу. Виявляється, що режим течії повністю визначається числом Рейнольдса і не залежить від величин v , μ , d , ρ окремо. Існує деяке число Рейнольдса, яке називають критичним $Re_{кр}$. При $Re < Re_{кр}$ течія ламінарна, а при $Re > Re_{кр}$ — турбулентна. Точніше у кожному конкретному випадку існує деякий вузький діапазон значень чисел Рейнольдса, які можна розглядати як критичні. При критичних значеннях числа Рейнольдса і відбувається зміна режимів руху рідини (таку зміну можна вважати стрибкоподібною, оскільки діапазон $Re_{кр}$ вузький). Дослідами встановлено, що для напірного руху рідини в циліндричних трубах круглого перерізу $Re_{кр} \approx 2300$.

Проте на значення $Re_{кр}$ впливають різні збурення, що утворюються в потоці на вході його в трубу, а також збурення від різних запірних пристроїв, які трапляються на шляху проходження потоку (клапанів, кранів, перехідних камер тощо).

Ретельним усуненням джерел збурення під час проходження рідини в круглих трубах вдавалось значно підвищити $Re_{кр}$. При цьому створена ламінарна течія виявлялась нестійкою і при незначних збуреннях переходила в турбулентну. Для умов, які звичайно спостерігаються в практиці, потік у трубах буде турбулентним тоді, коли число Рейнольдса перевищує 2300.

ЕНЕРГІЯ ЕЛЕМЕНТАРНОЇ СТРУМИНКИ І РІВНЯННЯ БЕРНУЛЛІ

Розглянемо ділянку елементарної струминки нестисливої ідеальної (нев'язкої) рідини між плоскими, нормальними до осі струминки перерізами 1—1 та 2—2 (рис. 3.7).

Площа поперечного перерізу струминки, швидкість і тиск позначимо: в перерізі 1—1 через A_1 , v_1 , p_1 а в перерізі 2—2 через A_2 , v_2 , p_2 . Нехай z_1 і z_2 відповідні висоти, тобто відстані від горизонтальної площини θ — θ до центрів ваги об'ємів 1—1' та 2—2'.

$$v_1^2/(2g) + Z_1 + P_1/(pg) = v_2^2/(2g) + z_2 + P_2/(pg). \quad (3.24)$$

Рівняння (3.24) добуто для довільних перерізів струминки 1—1 та 2—2, тому воно справедливе для будь-якого перерізу струминки і його можна записати у вигляді

$$v^2/(2g) + z + p/(pg) = \text{const}, \quad (3.25)$$

Рівняння (3.25) називається **рівнянням Бернуллі для елементарної струминки ідеальної рідини**. Всі три члени рівняння мають лінійну розмірність. Величина z , як геометрична висота, вимірюється в метрах.

Геометричний зміст рівняння Бернуллі полягає в тому, що при усталеному русі ідеальної рідини сума трьох висот: геометричної z , п'єзометричної $p/(pg)$ і швидкісної $v^2/(2g)$ — не змінюється вздовж цієї елементарної струминки.

Рівняння Бернуллі (3.25) відбиває закон балансу енергії. Справді, перші два його члени $v^2/(2g)$ і z являють собою кінетичну і потенціальну енергії потоку, віднесені до одиниці маси рідини, а останній член $p/(pg)$ — роботу зовнішніх сил. Суму всіх трьох складових у лівій частині формули (3.25), тобто тричлен $z + p/(pg) + v^2/(2g)$, називають **повним напором** і позначають H

$$H = z + p/(pg) + v^2/(2g) = \text{const}, \quad (3.45, a)$$

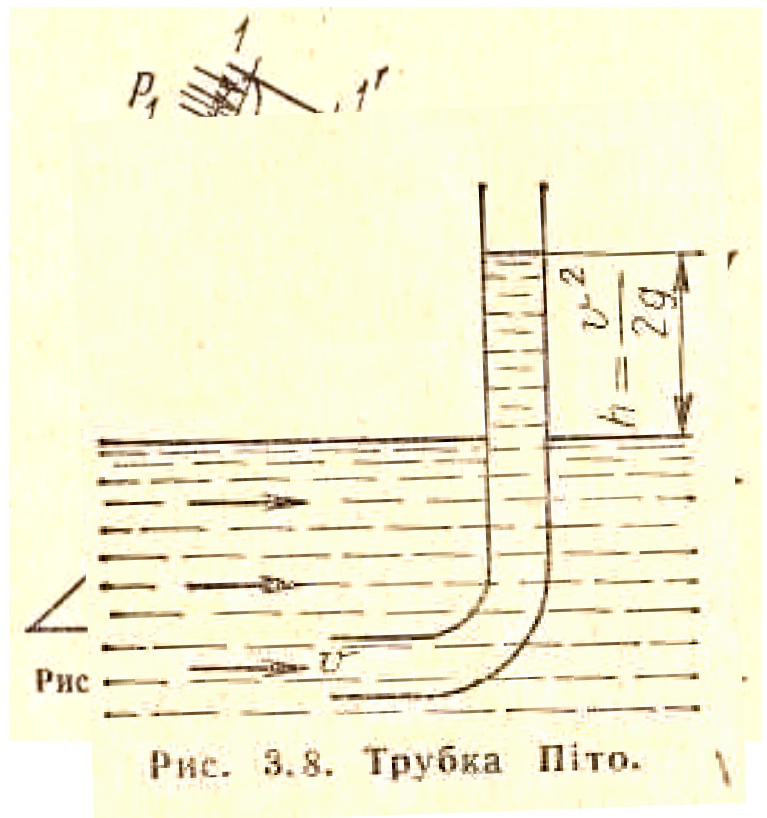
де z — геометричний напір; $p/(pg)$ — п'єзометричний напір; $v^2/(2g)$ — швидкісний напір.

Як приклади, що пояснюють рівняння Бернуллі, розглянемо принципи дії деяких приладів, призначених для вимірювання швидкості проходження рідини. Найпростішим приладом для вимірювання швидкості у відкритому потоці є

трубка Піто (рис. 3.8). Вона являє собою зігнуту трубку невеликого діаметра, встановлену в потоці рідини, що рухається, відкритим кінцем назустріч течії, і так, що вісь трубки збігається з напрямом потоку. При цьому у вертикальній частині трубки рідина піднімається на висоту h , яка дорівнює швидкісному напору: $h = v^2/(2g)$. Звідки $v = \sqrt{2gh}$.

Фактично наявність трубки в потоці дещо спотворює загальний розподіл швидкостей. Крім того, в реальній рідині позначається вплив в'язкості. Тому при визначенні швидкості в формулу вводять поправочний коефіцієнт ζ_1

$$v = \zeta_1 \sqrt{2gh}, \quad (3.26)$$



Коефіцієнт ζ_1 відшукують експериментально для кожної трубки.

Трубку Піто можна використовувати й для вимірювання швидкості в закритих трубопроводах (рис. 3.9, а), застосовуючи її разом із звичайною п'єзометричною трубкою. Такий пристрій, який має трубку Піто і п'єзометричну трубку, називають трубкою Прандтля (рис. 3.9, б).

У цьому пристрої трубка Піто показує повний напір рідини в трубі

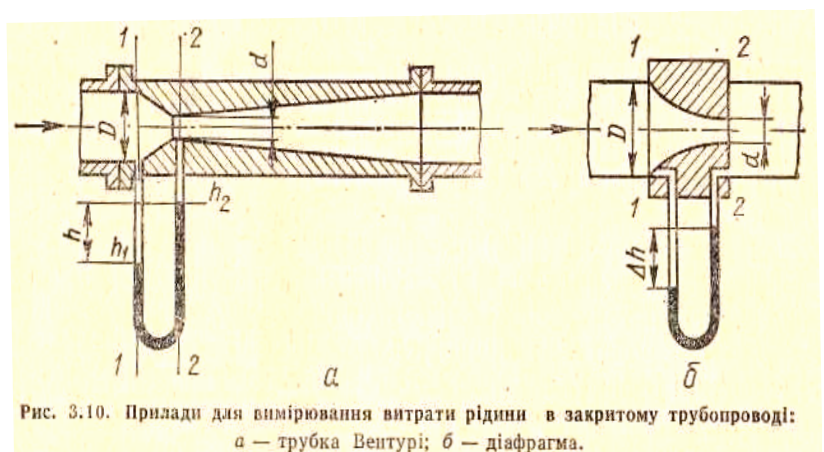
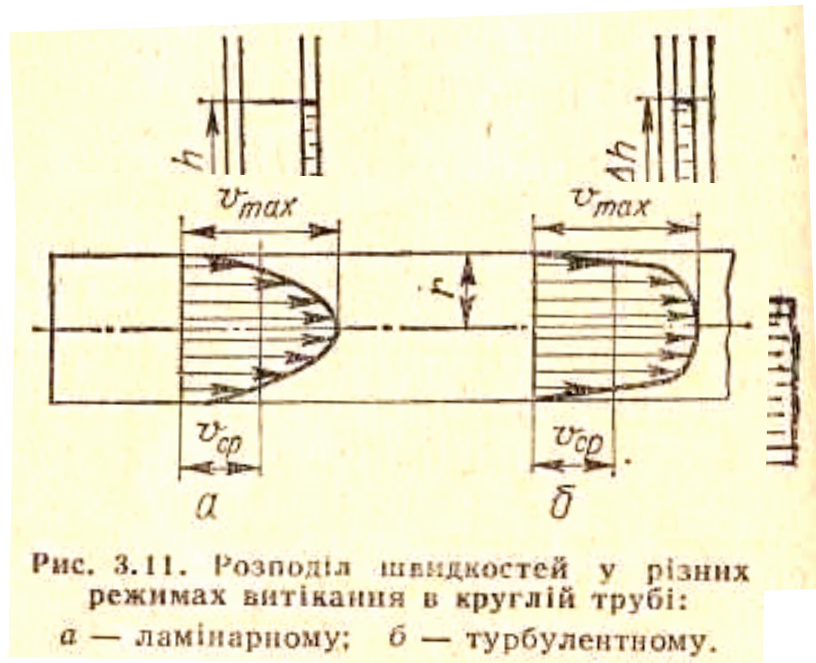
$p/(\rho g) + v^2/(2g)$, п'єзометрична трубка — статичний напір $p/(\rho g)$ у тому самому перерізі труби. Різниця цих напорів $v^2/(2g)$ дорівнює різниці рівнів Δh в обох трубках.

Таким чином, $v = \sqrt{2g\Delta h}$.

Витрату рідини вимірюють трубкою Вентурі (рис. 3.10, а) або діафрагмою (рис. 3.10, б).

РІВНЯННЯ БЕРНУЛЛІ ДЛЯ ПОТОКУ РЕАЛЬНОЇ РІДИНИ

Рух рідини в трубах. Рух рідини може бути або ламінарним, або турбулентним. Теоретичними і лабораторними дослідженнями встановлено, що при ламінарному режимі руху в'язкої рідини в круглій циліндричній трубі до її стінок «прилипає» досить тонкий шар рідини, швидкість руху якого на стінках труби дорівнює нулю. Швидкість руху наступних шарів рідини в міру наближення їх до осі труби збільшується й досягає максимуму в центрі труби. Отже, при ламінарній течії розподіл швидкостей по перерізу труби параболический (рис. 3.11, а). Розподіл швидкостей по перерізу труби при турбулентній течії встановлюють експериментально, на стінках труби швидкості при цьому так само дорівнюють нулю внаслідок «прилипання» до них частинок рідини. На дуже невеликій відстані від поверхні стінки швидкості можуть мати досить великі значення, які мало відрізняються від значень швидкостей в інших точках перерізу труби. Поблизу осі труби швидкості руху рідини збільшуються, але не дуже (рис. 3.11, б). Проте течія з такими профілями швидкості



встановлюється не на самому вході в трубу, а на деякій відстані від нього і має назву *гідродинамічно стабілізованої*. Проте на ділянці від входу в трубу й до початку стабілізованої течії характер руху рідини зазнає великих змін. У вхідному перерізі (при достатньому заокругленні стінок і коли рідина втікає з великого об'єму) швидкість стала. Проте як тільки починається рух по трубі, найближчі до стінок частинки рідини прилипають до них, внаслідок чого швидкість поблизу стінок різко зменшується. Оскільки витрата рідини при цьому залишається сталою, то швидкість у центрі перерізу труби відповідно зростає. При цьому біля стінок труби утворюється так званий *гідродинамічний пограничний шар*, тобто шар, що характеризується великим поперечним градієнтом поздовжньої складової швидкості. Залежно від характеру руху рідини розрізняють *ламінальний і турбулентний пограничні шари*.

У турбулентному пограничному шарі завжди є найтонший підшарок, що називається в'язким, де турбулентні пульсації поступово затухають внаслідок дії сил в'язкості. З моменту надходження рідини до труби і до встановлення стабілізованої течії товщина пограничного шару поступово наростає по довжині труби, поки не заповнить усього перерізу. З цього моменту утворюється сталий профіль швидкості і течія стає стабілізованою.

Рівняння Бернуллі для потоку реальної рідини.

З'ясуємо, які треба внести зміни в рівняння Бернуллі, виведене для струминки ідеальної рідини, щоб воно стало придатним для потоку реальної рідини в трубі.

Перша зміна полягає в тому, що при виведенні рівняння Бернуллі (3.24) для струминки ідеальної рідини швидкості v в усіх точках поперечного перерізу струминки вважали однаковими. Тому член рівняння $v^2/(2g)$ відбивав дійсну питому енергію струминки.

У потоці реальної рідини швидкості в різних точках поперечного перерізу різні, і для розрахунку беруть середню швидкість. Обчислене за середньою швидкістю значення питомої кінетичної енергії потоку дещо менше від її дійсного значення. Тому в рівняння Бернуллі для потоку реальної рідини вводять поправочний коефіцієнт $\alpha > 1$.

Друга зміна пов'язана з тим, що під час руху реальної рідини частина енергії витрачається на подолання різних опорів рухові рідини. Тому в рівняння Бернуллі введемо поправочний член $h_{\text{пов}}$, що враховує втрати напору на деякій ділянці 1—2.

З урахуванням цих поправок рівняння Бернуллі для потоку реальної рідини набуває вигляду

$$\alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + z = \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + z_2 + h_{\text{пов}}, \quad (3.30)$$

де α - поправочний коефіцієнт, який визначають дослідами. Для ламінарного режиму течії рідини в круглій трубі $\alpha = 2$, а для турбулентного режиму $\alpha = 1,04 \dots 1,13$; $h_{\text{пов}}$ — повна втрата напору. Вона складається з лінійних втрат $h_{\text{л}}$ і втрат на місцеві опори $h_{\text{М}}$:

$$h_{\text{пов}} = h_{\text{л}} + h_{\text{М}}$$

Лінійні втрати напорі.

Це втрати на подолання внутрішнього тертя між різними шарами рідини, що рухаються один відносно одного. Тому внутрішнє тертя істотно залежить від розподілу швидкостей у потоці, а отже, й від режиму течії рідини.

$$h_{\text{л}} = \frac{64}{\text{Re}} \frac{l}{d} \frac{v}{2g} \quad (3.35)$$

Рівняння (3.35) використовують для будь-яких режимів течії рідини і записують у вигляді *формули Дарсі — Вейсбаха*:

$$h_{\text{л}} = f \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (3.36)$$

I

де f — коефіцієнт тертя, що є функцією числа Рейнольдса.

Для стабілізованої ламінарної течії в круглій трубі значення f визначають за формулою Пуазейля:

$$f = 64/\text{Re}.$$

Розподіл швидкостей у турбулентному потоці не має параболічного характеру (див. рис. 3.11, б), а коефіцієнт тертя $f \neq 64/\text{Re}$ і його залежність від числа Рейнольдса визначається ступенем шорсткості стінок труб.

Цю залежність у 1932 р. експериментально дослідив І. Нікурадзе на трубах із штучною рівномірною шорсткістю.

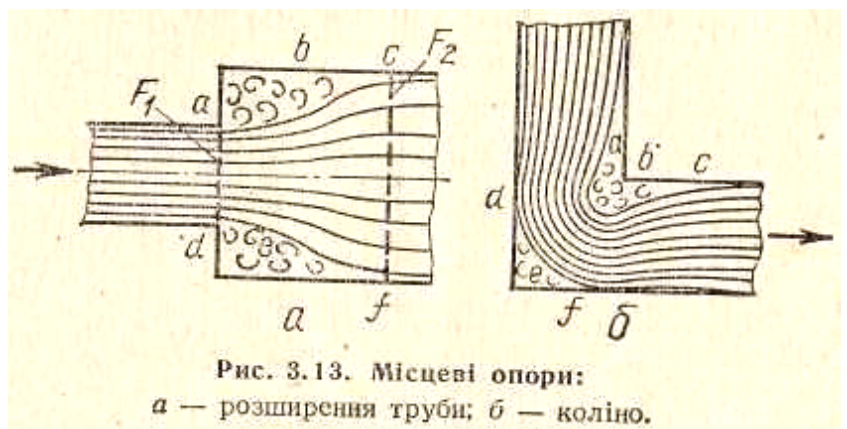


Рис. 3.13. Місцеві опори:
а — розширення труби; б — коліно.

Місцеві втрати напорі.

Місцевими опорами називають різні перешкоди в трубопроводах — вентилі, коліна, крани, дифузори, звужини і розширення.

Під час проходження рідини через місцеві опори утворюються області вихрового невпорядкованого руху. На рис. 3.13 ці області зображено відокремленими від основного потоку поверхнями поділу abc та def . Втрати напорі на місцеві опори зумовлені великими витратами енергії на внутрішнє тертя в подібних областях. Для найрізноманітніших місцевих опорів залежність цих втрат від швидкості можна вважати квадратичною й записати у вигляді

$$h_{\text{м}} = \zeta v^2 / 2g, \quad (3.39)$$

де v — середня швидкість потоку після місцевого опору;

ζ — коефіцієнт місцевого опору.

Прийнявши, що площа перерізу $a — d$ дорівнює A_1 , а площа перерізу $c — f$ дорівнює A_2 , можна залежно від місцевих опорів розрахувати коефіцієнт ζ . При раптовому розширенні потоку від перерізу $a — d$ до перерізу $c — f$ коефіцієнт ζ обчислюють за формулою

$$\zeta = \left[\left(\frac{A_2}{A_1} - 1 \right) \right]^2$$

У дифузорі — конічному розширенні труби від перерізу a — d до перерізу c — f коефіцієнт ζ дорівнює

$$\zeta = k \left[\left(\frac{A_2}{A_1} - 1 \right) \right]^2$$

де k — експериментальний коефіцієнт. Його залежність від кута розхилу конуса.

Для заокруглень трубопроводу з кутом повороту ϕ коефіцієнт ζ визначають за формулою Вейсбаха:

$$\zeta = [0,131 + 0,163 (d/r)^{3.5}] \phi / 90^\circ,$$

де d — діаметр труби; r — радіус скруглення.

Різні запірні пристрої та трійники також є місцевими опорами. Значення коефіцієнтів місцевого опору для них можна знайти в спеціальних довідниках.

ТРУБОПРОВОДИ

Рух потоку в закритих і суцільно заповнених циліндричних трубах широко використовують для переміщення різних рідин (води, нафти, масла, розчинів тощо) як у лабораторній, так і виробничій техніці. Окремі чи з'єднані між собою труби, по яких транспортують рідини і гази, називають **трубопроводами**. Труби для трубопроводів виготовляють різних діаметрів: від досить малих для контрольно-вимірювальної апаратури і лабораторної техніки до дуже великих, які вимірюють метрами, наприклад трубопроводи для гідротехнічних споруд. Трубопроводи виготовляють із сталі, бетону, гуми та інших матеріалів.

Залежно від гідравлічної схеми роботи трубопроводи поділяють на прості і складні. В *простих* трубопроводах немає точок відгалуження на всій довжині від точки забору до точки споживання. *Складні* трубопроводи складаються з основної магістральної труби й ряду відгалужень, що відходять від неї. Трубопроводи бувають з *транзитною витратою*, коли по всій їхній довжині (від вихідної точки до кінцевої) витрата залишається сталою, і трубопроводи з *шляховою витратою*, коли витрата змінна, тобто коли рідина втрачається під час транспортування.

Звичайно в трубопроводах рідини переміщуються примусово під деяким заданим тиском. При цьому рідина тисне на стінки труб зсередини, намагаючись розірвати їх. В тих випадках, коли труби працюють під тиском, нижчим за атмосферний (всмоктувальні трубопроводи), вони мають бути досить жорсткими і не сплющуватись під дією різниці тисків між тим, що в трубі, і атмосферним. Коли ж треба, щоб трубопровід був гнучким, його виготовляють з гуми чи з пластичних матеріалів. Такі трубопроводи бувають трьох видів:

а) *армовані зсередини* по всій довжині труби дротяними витками, у вигляді розтягнутої пружини;

б)армовані дротяними витками, закладеними всередині стінок труби при її виготовленні, що утворюють ніби потрійну стінку (полімер — арматура — полімер);

в)вакуумні гумові труби з товщиною стінки, що дорівнює внутрішньому діаметру труби.

Усі три види труб досить жорсткі й добре чинять опір сплющуванню.

Гідравлічний розрахунок простого трубопроводу. Для розрахунку трубопроводу слід розв'язати три основні завдання

- 1) визначити перепад (втрати) напору, потрібного для пропускання заданої витрати рідини;
- 2) визначити витрату рідини при заданому перепаді напору;
- 3) визначити оптимальний переріз трубопроводу.

ГІДРАВЛІЧНИЙ УДАР

У попередніх параграфах під час вивчення рідини вважали, що вона нестислива. Проте в такому явищі, як гідравлічний удар, треба приховувати здатність рідини стискатися.

Гідравлічним ударом називають комплекс явищ, що відбуваються в рідині під час різкого зменшення швидкості її течії. При цьому в рідині утворюється затухаючий коливальний процес чергування різкого підвищення й зниження тиску.

Уявімо собі, що по трубопроводу тече потік з швидкістю v . Коли різко перепинити йому шлях заслінкою, краном чи будь-яким іншим запірним пристроєм, то рух рідини припиняється не відразу по всьому трубопроводу. Спочатку припиниться рух передніх шарів рідини, розташованих безпосередньо біля самої заслінки. Дальші шари, не маючи можливості продовжувати рух, стискатимуть передні шари, в зв'язку з чим їх рух припиниться. В шарах, що проходять один за одним, утворюється область підвищеного тиску, яка у вигляді ударної хвилі відіб'ється від засувки з швидкістю c у напрямі, протилежному напрямові руху рідини.

Ударна хвиля, досягши початкового перерізу труби, може (за певних умов) почати зворотний рух до засувки з тією самою швидкістю, проте вже із зниженим тиском. Досягши перерізу засувки, ударна хвиля з меншим тиском знову повернеться до початкового перерізу трубопроводу. Таким чином, при гідравлічному ударі в рідині відбувається процес почережного різкого підвищення і зниження тиску, який завдяки в'язкості рідини швидко затухає.

Значення стрибка тиску Δp при повній зупинці рідини в місці зіткнення гідравлічного удару визначають за формулою, виведеною російським ученим М. Є. Жуковським:

$$\Delta p = \rho v c, \quad (3.45)$$

де ρ — густина рідини; v — швидкість руху рідини до встановлення засувки; c — швидкість поширення ударної хвилі, яка звичайно близька до швидкості поширення звуку в цій рідині.

Чим вища стисливість рідини, тим нижча швидкість поширення ударної хвилі в ній, а отже, й Δp в формулі (3.45). Крім того, деяка деформація труби під час гідравлічного удару також знижує його значення. Проте, незважаючи на це, стрибок тиску при гідравлічному ударі дуже великий (від 1 до 10 МПа). Тому, щоб запобігти або послабити гідравлічний удар, встановлюють запірні пристрої, які не відразу, а поступово перетинають потік, що рухається. Іноді встановлюють перед засувками повітряні ковпаки або пружинні компенсатори, які сприймають підвищений тиск і локалізують поширення гідравлічного удару.

Контрольні запитання і завдання

1. Якими елементами характеризується потік рідини ?
2. Що називається елементарною струминкою ?
3. В чому різниця між змоченим периметром і живим перерізом ?
4. Напишіть рівняння Бернуллі для елементарної струминки ідеальної і реальної рідини.
5. Охарактеризуйте режими руху рідини.
6. Число Рейнольдса, його критичне значення.
7. Що таке гідравлічні опори, чим вони обумовлені, як класифікуються та що відбувається з напором у них ?
8. Гідравлічний удар у трубах. Причини його виникнення .