ЛЕКЦІЯ № 2 Гідростатика

Змістовий модуль 1 “Основи гідравліки”

Тема: Гідростатика

Мета: Вивчити основне рівняння гідростатики. Ознайомитися з видами тиску, а також з методикою знаходження сили тиску на плоскі і криволінійні поверхні.

План лекції

1. Поняття і види рівноваги рідин.
2. Гідростатичний тиск та його властивості.
3. Епюри гідростатичного тиску.
4. Сили гідростатичного тиску. Закон Паскаля.
5. Основи теорії плавання тіл. Закон Архімеда.

Матеріал лекції

1.Поняття і види рівноваги рідин

Диференціальні рівняння рівноваги рідин (рівняння Ейлера)

Диференціальні рівняння рівноваги рідини є математичним обґрунтуванням розподілу тиску усередині рідини, яка знаходиться в стані рівноваги. Рівняння виведені дійсним членом Російської академії наук (м. С-Петербург) в 1755 р. Л.Ейлером.

При виведенні рівнянь, в об’ємі рідини, яка знаходиться в стані рівноваги, виділяється нескінченно малий об’єм рідини у формі паралелепіпеда з ребрами dx, dy, dz поміщений в систему прямокутних координат (рис.1). Умовно відкинемо оточуючу паралелепіпед рідину, а її дію замінимо відповідними силами. Приймемо, що в центрі грані BCDE, в точці А діє тиск *p*. Так як тиск є безпосередньою функцією координат, то розклавши цю функцію в ряд Тейлора по прирощенню *∂p* і обмежуючись при цьому двома першими членами отримаємо вираз для тиску в центрі бокової грані GLNK

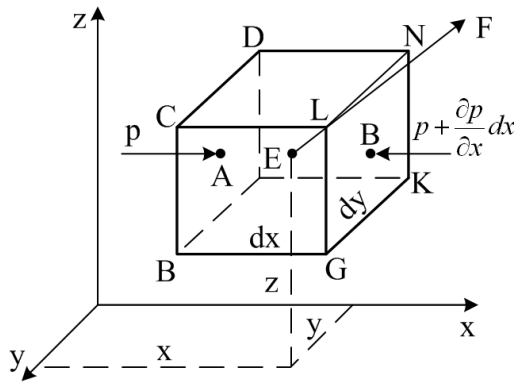

Рис. 1. Схема до виведення рівнянь рівноваги рідини.

$$p+\frac{\partial p}{\partial x}dx \qquad (1)$$

На грань BCDE діє сила тиску P = *p*x dydz, а на грань GLNK - $\left(p+\frac{\partial p}{\partial x}dx\right)dydz$.

Крім сил тиску, на паралелепіпед діють масові сили F , проекція яких на вісь *x* буде.

Проекціюючи на вісь x усі зовнішні сили, які діють на паралелепіпед, отримаємо

$$pdydz-(p+\frac{\partial p}{\partial x}dx)dydz+\rho dxdydz\,F_x=0 \qquad (2)$$

Після спрощення маємо

$$-\frac{\partial p}{\partial x}dxdydz+\rho dxdydz\,F_x=0. \qquad (3)$$

Остаточно для вісі *x* отримаємо (в тому числі аналогічно і в напрямку вісей y, z)

$$-\frac{\partial p}{\partial x}+\rho F_x=0;\ -\frac{\partial p}{\partial y}+\rho F_y=0;\ -\frac{\partial p}{\partial z}+\rho F_z=0. \qquad (4)$$

Отримані рівняння і є диференціальними рівняннями рівноваги рідини, або рівняннями Ейлера. Кожне з них характеризує зміну тиску в напрямку відповідної вісі координат.

Якщо кожне з рівнянь (4) помножити, відповідно, на ρdx, ρdy, ρdz і склавши почленно отримаємо:

$$\frac{\partial p}{\partial x}dx+\frac{\partial p}{\partial y}dy+\frac{\partial p}{\partial z}dz=\rho\left(F_x dx+F_y dy+F_z dz\right). \qquad (5)$$

Ліва частина цього рівняння є повним диференціалом тиску d*p*, тобто

$$dp=\frac{\partial p}{\partial x}dx+\frac{\partial p}{\partial y}dy+\frac{\partial p}{\partial z}dz \qquad (6)$$

Як наслідок

$$dp=\rho\left(F_x dx+F_y dy+F_z dz\right). \qquad (7)$$

Так як густина однорідної рідини ρ = const, то рівняння (7) має сенс тільки тоді, коли його права частина є також повним диференціалом якоїсь функції u (*x*, *y*, *z*), частинні похідні якої по *x*, *y*, *z* ,були б:

$$F_x=\frac{\partial u}{\partial x};\ F_y=\frac{\partial u}{\partial y};\ F_z=\frac{\partial u}{\partial z}. \qquad (8)$$

Отримані функції називаються потенціальними. Тоді рівняння (7) прийме вигляд:

$$dp=\rho du,\ \text{або}\ dp=-\rho d\Pi, \qquad (9)$$

де d*П* = d*U*.

Функція *П* (*x*, *y*, *z*) виражає потенціальну енергію поля масових сил.

Проінтегрувавши останнє рівняння (9) отримаємо

$$p = -\rho П + c, \qquad p + \rho П = c, \tag{10}$$

де c - довільна постійна інтегрування.

Для двох точок одного і того об'єму однорідної нестискуваної рідини рівняння (10) буде мати вигляд

$$p_0 + \rho \Pi_0 = p_1 + \rho \Pi_1. \tag{11}$$

За допомогою рівняння (11) можна знайти гідростатичний тиск в любій точці рідини, якщо відомі значення функцій $П_1$, p_o і $П_o$.

2.Гідростатичний тиск та його властивості

Гідростатика – це розділ гідравліки в якому вивчається рівновага (спокій) рідин і розглядаються метод застосування законів в інженерній практиці, що описують рівновагу рідин.

В інженерній практиці розглядають два види рівноваги рідин – абсолютна і відносна.

При абсолютній рівновазі рідина і посудина в якій вона знаходиться нерухомі відносно Землі. Прикладами до абсолютної рівноваги рідини є цистерни, що встановлюються на базах та складах паливно-мастильних матеріалів, різні баки для зберігання рідин, які встановлюють на нерухомих опорах.

При відносній рівновазі рідина нерухома відносно посудини у якій вона знаходиться, а сама посудина здійснює якийсь вид руху – прямолінійний чи обертовий. Прикладами до відносної рівноваги рідини є залізничні цистерни, в яких перевозяться рідини, автобензовози, автомолоковози, і ін.

Таким чином, об'єктом чи предметом вивчення в гідростатиці є рідина, чи її певний об'єм, які знаходяться в стані рівноваги.

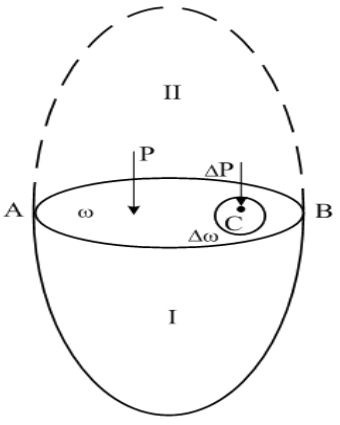

Рис. 2 Схема до обґрунтування понять середнього гідростатичного тиску і гідростатичного тиску в точці

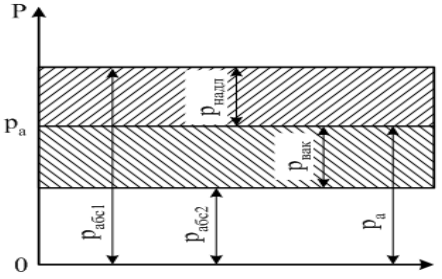

Рис. 3 Схема до обґрунтування видів тиску

Основним параметром, який характеризує стан рівноваги рідини є гідростатичний тиск

Гідростатичний тиск **p, Па** – це стискуюче напруження, що виникає усередині рідини, яка знаходиться в стані рівноваги. В рідині, яка знаходиться в стані рівноваги, можливий лише один вид напруження – напруження стиснення і виникає воно під дією сил про які відмічалося раніше. Гідростатичний тиск це диференцююча характеристика, тобто він діє в любій точці рідини.

Для ілюстрації і теоретичного обґрунтування явища гідростатичного тиску розглянемо деякий об'єм рідини, яка знаходиться в стані рівноваги (рис. 2)

Розсічемо, уявно, цей об'єм рідини площиною А-В на дві частини – нижню I і верхню II, а площу перерізу позначимо через ω.

Уявно, відкинемо верхню частину II, а її дію, для збереження рівноваги частини I, замінимо силою P, еквівалентною дії відкинутої частини II на нижню частину I. Відношення сили до площі перерізу буде середнім гідростатичним тиском на площі ω, який описується формулою:

$$p_{ср} = P / \omega . \qquad (12)$$

Видділимо на площі перерізу ω елементарну площадку площею Δω, на яку буде діяти частка Δ*P* сили *P*. Границя відношення елементарної сили ΔP до площі $\Delta\omega$, при наближенні останньої до ноля називається ***гідростатичним тиском в точці*** (згідно з рис. 2. в точці С), що описується формулою:

$$p = \lim_{\Delta\omega \to 0} \frac{\Delta P}{\Delta\omega}, \qquad (13)$$

Крім названої раніше одиниці вимірювання тиску Па (1 Па = Н/м^2) в техніці часто застосовуються і такі не системні одиниці тиску: 1 технічна атмосфера = 1 кгс/см^2 = 10^4 кгс/м^2 = 10^5 Н/м^2 ~ 10^5 Па ~1 бар = 735 мм рт.ст = 10000 мм вод. ст. = 10 м. вод. ст.

Гідростатичний тиск ділиться на абсолютний надлишковий (манометричний) і вакуумметричний.

Абсолютний тиск, $p_{абс}$ – це тиск, який відраховується від нулевого значення тиску.

Надлишковий (манометричний) тиск, p – це тиск на величину якого абсолютний тиск в точці перевищує атмосферний тиск. Його можна визначити за формулою:

$$p = p_{абс1} - p_a , \qquad (14)$$

де p_a – атмосферний тиск.

Манометричним він називається тому, що вимірюється манометрами. Так як в інженерній практиці переважає саме надлишковий тиск, то при його позначенні літера *p* не супроводжується символом "*н*".

Вакуумметричний тиск, $p_{вак}$ – це тиск, на величину якого абсолютний тиск

в любій точці буде менше за атмосферний тиск, його можна визначити за формулою:

$$p_{вак} = p_a - p_{абс2} \qquad (15)$$

Це проілюстровано на рис. 3. Максимальний вакуум (при $p_{абс2}= 0$) не може бути більшим, ніж атмосферний тиск p_a.

Вакуум – термін латинського походження від vacuum, що значить розрідження, тобто недостача тиску до атмосферного. Вакуумметричний тиск має місце в усмоктувальних трубах насосних установок. Слід підкреслити, що вакуум це зовсім не пустота, це тільки недостача абсолютного тиску до атмосферного і він може мати місце як в газовому середовищі, так і у середині рідини. Слід враховувати і ту обставину, що при малих тисках, наприклад вода може перетворитися в пару, а тому в трубопроводах (зокрема, в усмоктувальних трубопроводах насосів) не допускається перевищення вакууму більш ніж на 7 м водяного стовпа.

Гідростатичний тиск характеризується трьома основними властивостями.

Гідростатичний тиск завжди напрямлений по внутрішній нормалі до поверхні, на яку він діє.

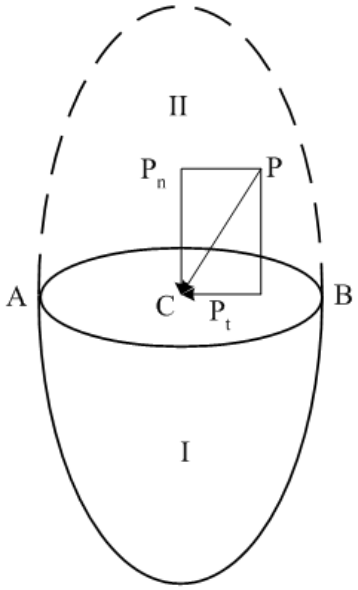

Рис. 4 Схема до обґрунтування першої властивості гідростатичного тиску.

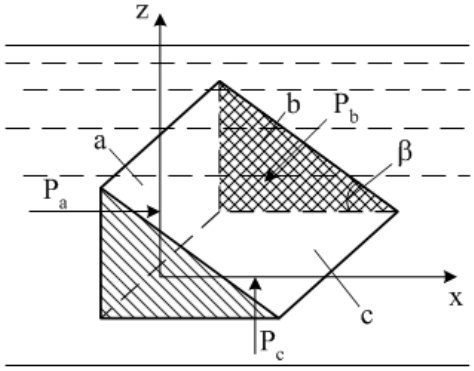

Рис. 5 Схема до обґрунтування другої властивості гідростатичного тиску.

Доводиться ця властивість методом від протилежного. Припустимо, що як і у попередньому випадку, після відкинення частини II від основного об’єму рідини її дія буде замінена силою P, яка напрямлена не по внутрішній нормалі до площини перерізу A-B, а під деяким кутом. Тоді силу P можна розкласти на дві складові: нормальну (перпендикулярну до площини A-B) P_n і дотичну P_τ. Так як

дотичне напруження має місце тільки в рухомій рідині то в цьому випадку $P_\tau = 0$. Тому зроблене нами припущення про напрямлення сили Р не по внутрішній нормалі неправильне. Таким чином, сила Р (див. рис. 4) діє тільки в напрямку складової P_n, тобто нормально до поверхні А-В. Що до напрямку її дії, то у випадку зовнішньої нормалі в рідині виникли б розтягуючі зусилля, що викликало б рух усередині рідини, а це суперечить умові рівноваги. Таким чином, сила гідростатичного тиску завжди діє стискуюче, тобто напрямлена по внутрішній нормалі.

Гідростатичний тиск в любій точці рідини діє однаково по всім напрямкам.

Для обґрунтування цієї властивості виділимо в рідині, яка знаходиться в стані рівноваги, трьохгранну призму зовсім малих розмірів (рис. 5). Припустимо, що на її грані діє різний гідростатичний тиск. Позначимо незаштриховані грані призми: вертикальну – **a**, горизонтальну - **c** і нахилену **b**. Умовою рівноваги призми є рівність нулю усіх діючих на неї сили: сил гідростатичного тиску і ваги рідини в об'ємі призми. Вагою рідини при доведенні можна знехтувати зважаючи на малість об'єму призми. Сили гідростатичного тиску, які діють на заштриховані торцеві грані, рівні за величиною і протилежні за напрямком, а тому і ними нехтуємо. Таким чином умовою рівноваги призми може бути рівність нулю суми проекцій на вісі X і Z сил гідростатичного тиску, які діють на грані – вертикальну **a**, горизонтальну **c** і нахилену **b**.

Сума проекцій на вісь x буде:

$$p_a \Delta S_a - p_b \Delta S_b \sin\beta = 0, \qquad (16)$$

де p_a і $p_в$ – гідростатичний тиск, який діє, відповідно, на грані **a i b**; ΔS_a і ΔS_b – площа грані, відповідно, **a** і **b**.

Сума проекцій на вісь, z буде

$$p_b \Delta S_b \cos\beta - p_c \Delta S_c = 0, \qquad (17)$$

де p_c, ΔS_c – відповідно, гідростатичний тиск, який діє на грань С і площа грані С.

Так як $\Delta S_b \sin\beta = \Delta S_a$ і $\Delta S_b \cos\beta = \Delta S_c$, то умову рівноваги можна переписати у вигляді $p_a \Delta S_a - p_b \Delta S_b = 0$ і $p_b \Delta S_b - p_c \Delta S_c = 0$, або $(p_a - p_b)\Delta S_a = 0$ і $(p_b - p_c)\Delta S_c = 0$, що можливо при $p_a = p_c$ і $p_b = p_c$. Тоді $p_a = p_b = p_c$. Таким чином, величина гідростатичного тиску не залежить від положення площадки, на яку він дії. Доведення цього положення ґрунтується на малості призми, що розглядається. Так як призма нескінченно мала, тобто "стягнута" в точку, то результати доведення можна повністю віднести до властивості гідростатичного тиску в точці.

Гідростатичний тиск в точці залежить від координат (положення) точки в рідині і від її густини, тобто:

$$p = f(x, y, z, \rho), \qquad (18)$$

де x, y, z, - координати положення точки в рідині; ρ – густина рідини.

Наприклад гідростатичний тиск в любій точці води зануреній на таку ж глибину як і в ртуті (при температурі обох рідин 0^oC) буде в 13,6 рази менше ніж

в останній ($\rho_{води}$ = 999,9 кг/м^3; $\rho_{рт}$ = 13596 кг/м^3).

Основне рівняння гідростатики

Основне рівняння гідростатики встановлює зв'язок між гідростатичним тиском в точці рідини, її місцем знаходження (координатами) в рідині та густиною останньої. Воно є рівнянням прикладного характеру, за його допомогою в інженерній практиці знаходиться гідростатичний тиск в любій точці рідини.

Для обґрунтування основного рівняння гідростатики розглянемо випадок, коли рідина в стані рівноваги знаходиться в посудині і на неї діє тільки сила ваги. В цьому випадку проекції масових сил на вісі координат (див. рис. 1) віднесені до одиниці ваги будуть, відповідно рівнятися:

$$x = 0,\ y = 0, F_z = -g. \tag{19}$$

Підставимо значення проекцій в рівняння отримаємо залежність

$$dp = -\rho g dz. \tag{20}$$

Проінтегрувавши рівняння (20)з умовою, що ρ = const і що в межах об'єму рідини який розглядається, можна знехтувати зміною прискорення вільного падіння, тобто g = const, отримаємо:

$$p = -\rho g z + c. \tag{21}$$

де c – довільна постійна.

Розділивши рівняння (21) на ρg, отримаємо

$$z + p(\rho g) = const. \tag{22}$$

Розділивши рівняння (21) на ρ отримаємо

$$gz + p/\rho = const. \tag{23}$$

Відзначимо, що члени рівняння (22) віднесені до одиниці ваги, а (23) – до одиниці маси. Граничні умови на поверхні рідини відомі: $z = z_o$ і $p = p_o$, тоді:

$$c = z_0 + p_0/(\rho g). \tag{24}$$

Підставивши цей вираз для постійної інтегрування в формулу (21), отримаємо

$$z_0 + p_0/(\rho g) = z + p/(\rho g) \tag{25}$$

Рівняння (25) називають ***основним рівнянням гідростатики.***

З рівняння (25) витікає

$$p = p_0 + \rho g(z_0 - z), \tag{26}$$

тобто що тиск в точці А (рис. 6) в рідині, яка знаходиться в стані рівноваги більше, ніж тиск на поверхні, на величину яка дорівнює вазі стовпа рідини над цією точкою. Так як $z_0 - z = h$ формула (26) прийме вигляд

$$p_{абс} = p_0 + \rho g h, \tag{27}$$

де $p_{абс}$ – абсолютний тиск в точці; p_o - тиск на вільній поверхні; h - глибина занурення точки в рідині.

Рівняння (27) називається основним рівнянням гідростатики для

абсолютного тиску.

Таким чином, згідно з рівнянням (27) тиск в точці рідини, яка знаходиться в стані рівноваги, на глибині h під вільною поверхнею, дорівнює сумі тиску на вільній поверхні p_o (у відкритих посудинах він дорівнює атмосферному p_a) і тиску, обумовленому вагою стовпа рідини розташованої вище точки, тобто ρgh.

У відкритих посудинах (з атмосферним тиском на вільній поверхні) звичайно враховується тільки тиск ρgh, а атмосферний тиск взаємно врівноважується і рівняння (27) прийме вигляд:

$$p = \rho gh. \qquad (28)$$

Рівняння (28) є ***основним рівнянням гідростатики*** для надлишкового тиску. Таким чином. надлишковий тиск в любій точці у середині рідини виникає тільки від ваги її стовпа, розташованого над точкою.

Враховуючи, що $p_{абс} = p_a + p$ звідкіля $p=p_{абс}-p_a$ і враховуючи рівняння (28) отримаємо:

$$p = p_0 + \rho gh - p_a = (p_0 - p_a) + \rho gh = \Delta p + \rho gh, \qquad (29)$$

де $\Delta p = p_o - p_a$

Таким чином, в цьому випадку надлишковий тиск в любій точці рідини створюється як вагою стовпа рідини, так і надлишковим (а може і вакуумметричним) тиском на вільній поверхні, значення якого Δp.

Гідростатичний напір, п'єзометрична та вауумметрична висота

Це питання є своєрідною інтерпретацією основного рівняння гідростатики.

Геометричне зображення елементів основного рівняння гідростатики показано на рис. 9. Розглянемо основне рівняння гідростатики стосовно точки А.

Відлік значень усіх елементів будемо вести відносно горизонтальної площини 0-0, яка приймається в якості координатної.

В гідравліці ця площина називається ***площиною порівняння***. Основною умовою що до місця її розташування є її горизонтальність, тобто вона обов'язково повинна бути горизонтальна, у висотному відношенні вона може розташовуватись як завгодно (високо, чи низько), але з врахуванням умов задачі, яка розв'язується.

Рис. 6. Схема геометричного зображення (інтерпретація) основного рівняння гідростатики.

Ординати, які відміряються від неї називаються ***висотою положення***

точки, або геометричним напором в цій точці.

Згідно з рис. 6 ордината положення точки А відносно площини порівняння буде *Z*, вона має лінійну розмірність. Величина $p/(\rho g)$ є геометрична висота , на яку рідина піднімається під дією тиску. Її можна виміряти за допомогою, наприклад, скляної трубки(п'єзометра) з закритим верхнім кінцем і з якої видалене повітря, приєднаної до посудини на рівні точки А, тобто точки у якій вимірюється тиск. Розмірність величини $p/(\rho g)$ лінійна – $L^{-1}MT^{-2}/(L^{-3}MLT^{-2}) = L$ і показує геометричну висоту, на яку піднімається рідина під дією тиску p -в закритому п'єзометрі

Гідростатичним напором H в точці А називається сума ординат положення її відносно площини порівняння - Z і висоти стовпа рідини, що відповідає тиску p (див. рис. 6, зліва) тобто:

$$H = Z + p/(\rho g). \qquad (30)$$

З енергетичної токи зору гідростатичний напір – це міра енергії, яка належить одиниці ваги рідини, тобто питома енергія.

Якщо трубка (п'єзометр) відкрита (див. рис. 9, справа) і тиск на вільній поверхні дорівнює атмосферному, то рідина в трубці підніметься на висоту $P_{\text{надл}}/(\rho g)$, яка відповідає надлишковому тиску. Висота підняття рідни у відгритому п'єзометрі h_n під дією надлишкового тиску називається ***п'єзометричною висотою***

$$h_n = p_{надл}/(\rho g). \qquad (31)$$

Сума п'єзометричної висоти та ординати висотного положення точки приєднання відкритого п'єзометра є ***п'єзометричним напором,*** тобто

$$H_n = Z + h_n = Z + p_{надл}/(\rho g). \qquad (32)$$

П'єзометричний напір $H_{\text{п}}$ менше гідростатичного напору H на висоту (величину), яка відповідає атмосферному тиску, тобто $\Delta h = p_a/(\rho g)$

Площина, проведена на рівні рідини у закритому п'єзометрі, тобто через кінець відрізка $z + p/(\rho g)$, називається ***площиною гідростатичного напору***, а площина проведена на рівні рідини у відкритому п'єзометрі, тобто через кінець відрізка $z + p_{\text{надл}}/(\rho g)$ – ***площиною п'єзометричного напору.***

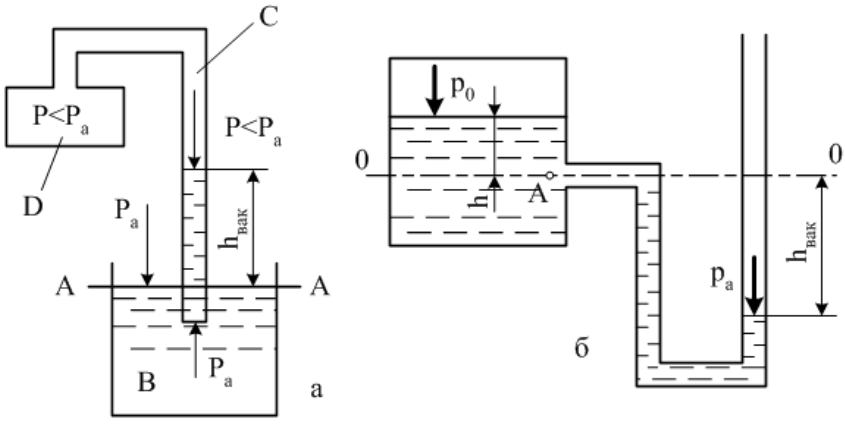

Рис. 7 Схеми до обґрунтування вакуумметричної висоти: а - вакуумметрична висота підняття стовпа рідини; б – вакуумметрична висота зниження стовпа рідини.

Вакуумметричною висотою $h_{вак}$ називається висота підняття (або зниження) рідини, що відповідає вакуумметричному тиску в рідині.

Візьмемо посудину D (рис. 7, а), в якій тиск менше атмосферного (тобто вакуумметричний) і

з’єднаємо її зігнутою трубкою з рідиною, яка знаходиться в посудині В. Так як в посудині D тиск менше атмосферного то рідина під дією атмосферного тиску p_a, який діє на її поверхні в посудні В, підніметься на висоту $h_{вак}$ яка і є вакуумметричною. Так як рідина знаходиться в стані рівноваги, то на лінії А-А (на вільній поверхні рідини) тиск буде врівноважений знизу і зверху, що за допомогою рівняння (39) можна описати так $p_a = \rho g h_{вак} + p$, де $p < p_a$, звідки вакуумметрична висота

$$h_{вак} = \frac{p_a - p}{\rho g} = \frac{p_{вак}}{\rho g}, \qquad (33)$$

а вакуумметричний тиск

$$p_{вак} = \rho g\, h_{вак}. \qquad (34)$$

Таким чином, вакуумметричний тиск дорівнює добутку ρg на вакуумметричну висоту.

На рис. 7, б вакуумметрична висота проілюстрована за допомогою зворотнього п’єзометра (вакуумметра) виконаного у вигляді зогнутої трубки по формі літери U. Очевидно, рівень рідини в правій частині трубки(див. рис. 7, б) опуститься нижче точки А (точки приєднання вакуумметра) на величину вакуумметричної висоти. Відносно площини порівняння 0-0 тиск в точці А збоку рідини в посудині визначиться із виразу:

$$p = p_0 + \rho g\, h\ , \qquad (35)$$

а з боку рідини в вакуумметрі:

$$p = p_a + \rho g\, h_{вак} \qquad (36)$$

Так як система знаходиться в стані рівноваги відносно площини 0-0 (яка проходить через точку А), то прирівнявши рівняння (35) і (36) отримаємо:

$$h_{вак} = \frac{p_a - p}{\rho g} \qquad (37)$$

Відносна рівновага рідин

Як уже визначалося раніше при відносній рівновазі рідина нерухома відносно посудини в якій вона знаходиться, але посудина здійснює якийсь вид руху.

В цьому випадку на рідину, крім сили тяжіння (ваги), діє і сила інерції. Практичний (інженерний) інтерес в цьому випадку полягає в установленні закону розподілу тиску в рідині, а також форми вільної поверхні. Оскільки в

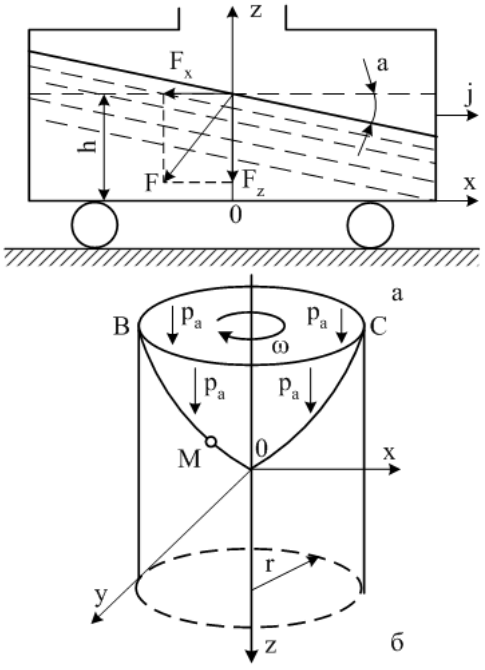

Рис. 8 Схеми до відносної рівноваги рідини: а - посудина рухається горизонтально; б - посудина обертається відносно своєї

інженерній практиці найбільш розповсюджені два види руху посудин з рідиною, то їх і розглянемо.

Посудина з рідиною рухається горизонтально з постійним прискоренням (наприклад залізнична цистерна) (рис. 8, а).

Згідно з вісями координат (див. рис. 8, а) на рідину діє сила ваги віднесеної до одиниці маси $F_z = -g$ і сила інерції $F_x = -j$, тоді отримаємо:

$$dp = -\rho(jdx + gdz). \tag{38}$$

Після інтегрування отримаємо

$$p = -\rho(jx + gz) + c. \tag{39}$$

Постійну інтегрування знайдемо з граничних умов x = 0, z = 0, $p = p_o$, отже $c = p_o$ тоді, переставивши місцями члени рівняння (39) отримаємо:

$$p = p_0 - \rho(jx + gz). \tag{40}$$

Отримане рівняння описує тиск в любій точці рідини, яка знаходиться під дією сили тяжіння g і горизонтального прискорення j. При x = 0 і z = 0 постійна інтегрування $c = \rho gh$, підставивши її значення в рівняння (40) отримаємо

$$p = \rho g(h - z) - jx. \tag{41}$$

З рівняння (41) видно, що найбільшим тиск буде в лівій, на рівні дна, точці.

2. Посудина з рідиною обертається навколо своєї вісі з постійною кутовою швидкістю ω, (наприклад рідинний тахометр) (рис. 8, б).

На рідину, в цьому випадку, буде діяти сила ваги і відцентрова сила, нормальна до вісі обертання, яка дорівнює:

$$C = mu^2 / r = m\omega^2 / r \ , \tag{42}$$

де m – маса рідини; u – окружна швидкість руху; r - радіус тіла обертання.

Проекції відцентрової сили, віднесені до одиниці маси, на вісі x, y, z будуть відповідно дорівнювати

$$F_x = \omega^2 x;; \ F_y = \omega^2 y; F_z = 0. \tag{43}$$

Проекції сили тяжіння відповідно будуть

$$F_x = 0; F_y = 0; F_z = g. \tag{44}$$

Для з'ясування закону розподілу тиску скористуємося рівнянням і, підставивши в нього значення проекцій сил згідно з рівняннями (43) і (44) отримаємо

$$dp = \rho(\omega^2 xdx + \omega^2 ydy + gdz). \tag{45}$$

Після інтегрування будемо мати

$$p = \frac{\rho\omega^2}{2}(x^2 + y^2) + \rho gz + c. \tag{46}$$

Так як початок координат знаходиться на поверхні, де діє атмосферний тиск p_a то постійна інтегрування при x = y = z = 0 буде дорівнювати $c = p_a$. Тоді рівняння (45) прийме вигляд:

$$p = p_a + \rho g z + \frac{\rho g \omega^2}{2g}(x^2 + y^2). \quad (47)$$

Так як $x^2 + y^2 = r^2$, то

$$p = p_a + \rho g z + \rho g \omega^2 r^2 / (2g). \quad (48)$$

За рівнянням (48) можна знайти гідростатичний тиск в любій точці рідини, посудина з якою обертається навколо вертикальної вісі.

Поверхні однакового тиску

Поверхні усередині об'єму рідини, в усіх точках яких тиск має постійну величину називаються ***поверхнями однакового тиску***. До них, в першу чергу, належить вільна поверхня рідини, так як тиск що діє на неї постійний, тобто $p = p_o$ = const. У випадку відкритої посудини на вільній поверхні рідини діє атмосферний тиск, тобто $p_o = p_a$. Рівняння поверхні рівного тиску можна отримати з формули (7), в якій приймемо dp = 0, із-за умови визначення рівного тиску при ρ ≠ 0, у вигляді

$$Fxdx + Fydy + Fzdz = 0. \quad (49)$$

Рівняння (61) є диференціальним рівнянням поверхонь однакового тиску. Застосуємо його для трьох можливих в інженерній практиці випадків.

1. Рідина знаходиться в стані абсолютної рівноваги.

В цьому випадку проекції масових сил будуть $F_x = 0$; $F_y = 0$; $F_z = -g$ (так як на рідину з масових сил діє тільки сила тяжіння). Тоді рівняння (50) прийме вигляд

$$-gdz = 0 \quad (50)$$

Після інтегрування отримаємо z = const, тобто в цьому випадку поверхня однакового тиску є ***горизонтальною площиною.***

2. Посудина з рідиною рухається горизонтально з постійним прискоренням (відносна рівновага).

В цьому випадку на рідину діють сила тяжіння g і сила інерції j, тоді проекції їх будуть $F_x = -j$; $F_y = 0$; $F_z = -g$, а рівняння (61) прийме вигляд:

$$-jdx - gdz = 0 \quad (51)$$

Після інтегрування отримаємо:

$$-jx - gz = C \quad (52)$$

Звідкіля при $x = 0$, $z = h$ постійна інтегрування $c = -gh$. Підставивши її значення в рівняння (52) отримаємо:

$$Z = h - jx / g \quad (53)$$

Отже, вільна поверхня рідини в цьому випадку (див. рис. 8 а) уявляє з себе нахилену площину з кутом нахилу

$$\alpha = arctg(j / g). \quad (54)$$

Поверхні однакового тиску будуть паралельні їй і також нахилені під кутом

α до горизонту.

3. Посудина з рідиною обертається навколо своєї вісі (див. рис. 8, б) з постійною кутовою швидкістю ω.

Для знаходження поверхні однакового тиску скористуємося рівнянням (47). Так як на поверхні рідини тиск дорівнює атмосферному, то рівняння (47) прийме вигляд

$$Z + \frac{\omega^2}{2g}\left(x^2 + y^2\right) = 0. \qquad (54)$$

Формула (54) є рівнянням параболоїда обертання. Таким чином, вільна поверхня рідини в цьому випадку є параболоїдом обертання, поверхні однакового тиску будуть також параболоїдами обертання, отримуваними на необхідній глибині.

Поверхні однакового тиску ніколи не перетинаються одна з одною і завжди перпендикулярні (нормальні) вектору прискорення масових сил.

3. Епюри гідростатичного тиску

Епюри гідростатичного тиску – це графічне зображення розподілу гідростатичного тиску по довжині контура тіла, на яке він діє. При їх побудові вектори тиску в кожній точці відкладаються нормально до поверхні на яку діє тиск і по величині рівні йому в даній точці.

Тиск в любій точці рідини визначається за основним рівнянням гідростатики, а вони є рівняннями прямої: для абсолютного тиску з вільним членом у вигляді $y = kx + b$, де кутовому коефіцієнту k відповідає вираз ρg, а вільному члену p – тиск на вільній поверхні $p_{ов}$; для надлишкового тиску– рівнянням прямої, яка проходить через початок координат ($b = \rho_o = 0$). Таким чином, зміна гідростатичного тиску по глибині описується лінійним законом і для побудови епюри необхідно мати дві точки.

Розглянемо вертикальну плоску стінку, яка підпирає рідину з глибиною H (рис.9,а). Приймаємо за початок координат точку 0, яка співпадає з лінією урізу (лінія торкання поверхні води з стінкою). Для побудови епюри абсолютного тиску ($p_{абс} = p_0 + \rho g h$) візьмемо першу точку на поверхні рідини, тобто h = 0 тоді $p_{абс}=p_0$, а другу на дні, тобто $h = H$, де $p_{абс} = p_0 + \rho g H$. З'єднавши ці дві точки прямою лінією отримаємо епюру абсолютного гідростатичного тиску у вигляді трапеції OBвс (див.рис. 9, а).

Аналогічно будується і епюра надлишкового тиску ($p = \rho g h$), при цьому при $h=0, p=0$, при $h=H$, $p = \rho g h$, а епюра має форму трикутника OBC (рис. 9 а). Епюри надлишкового тиску на нахилену, криволінійну та ламану стінку будуються за тим же принципом, що і на вертикальну плоску стінку (рис. 9 б, в, г, д). При дії тиску на вертикальну стінку OB з двох сторін результуючою розрахунковою буде трапецієподібна епюра OBNK (рис.9, е).

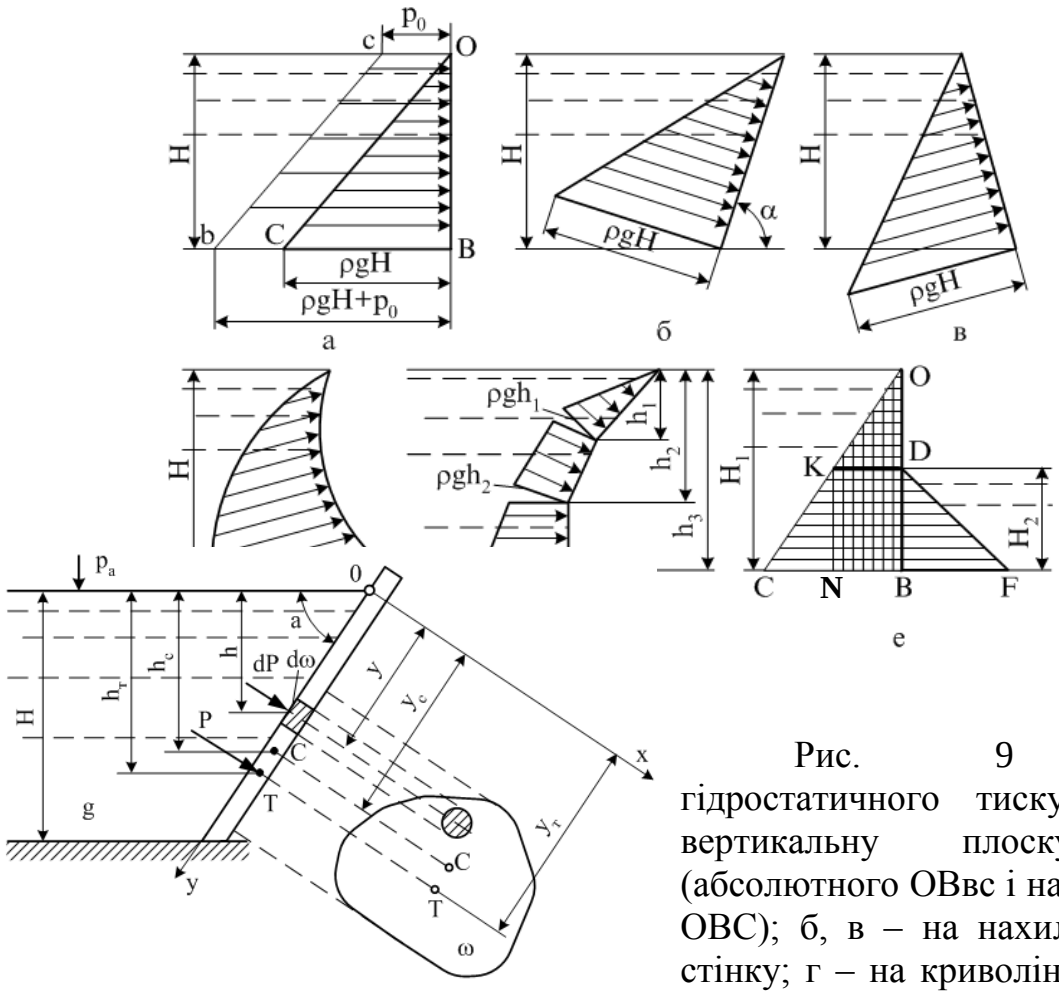

Рис. 10 Схема до визначення сили тиску на плоску поверхню та положення точки її прикладення (центру тиску).

Рис. 9 Епюри гідростатичного тиску: а – на вертикальну плоску стінку (абсолютного ОВвс і надлишкового ОВС); б, в – на нахилену плоску стінку; г – на криволінійну стінку; д – на ламану стінку; е – на вертикальну плоску стінку при дії тиску з двох сторін.

Епюри гідростатичного тиску показують навантаження на стінки (поверхні) і використовуються при статичних (міцністних) розрахунках різних гідротехнічних конструкцій.

4. Сила гідростатичного тиску

Сила гідростатичного тиску P, Н – це інтегруюча величина, тобто тиск сумірується по площі поверхні на яку він діє. Інакше кажучи – це рівнодіюча гідростатичного тиску. Ця величина, або характеристика гідростатичного тиску, використовується при міцністних і статичних розрахунках конструкцій та гідроспоруд. Крім значення сили тиску, важливим є й визначення місця її прикладення до конструкції чи гідроспоруди, що й буде розглянуто нижче.

Оскільки в інженерній практиці зустрічаються два види поверхонь, а саме плоскі і кріволінійні, то й розглянемо порядок визначення сили гідростатичного тиску на них, та порядок знаходження точки її прикладення.

Сила гідростатичного тиску при його дії на плоскі поверхні

Прикладами таких поверхонь є стінки посудин, призначених для зберігання

рідини, плоскі щити підпірних та перегороджуючих гідроспоруд і ін.

Розглянемо нахилену під кутом α плоску стінку площею ω (рис. 10), яка утримує рідину при глибині *H*.

Силу тиску *P* та місце її прикладання спочатку знайдемо ***аналітичним методом***.

За початок координат О приймемо точку зрізу, вісь *Y* приймемо співпадаючою з стінкою, а вісь X перпендикулярно до неї. На вільній поверхні рідини діє тиск p_o і вона має питому вагу γ.

Користуючись методом безкінечно малих величин візьмемо на стінці елементарну площадку площею $d\omega$, центр ваги якої занурений на глибину *h*.

Розглянемо спочатку елементарну силу ΔP, що виникне внаслідок дії абсолютного тиску на площадку $d\omega$, тобто $\Delta P_{абс}$.

$$\Delta P_{абс} = pd\omega = (p_o + \gamma h)d\omega, \qquad (55)$$

Проінтегрувавши рівняння (55) по всій площі ω отримаємо повну силу гідростатичного тиску

$$\Delta P_{\substack{абс \\ пов}} = \int dP = p_o \int_{\omega} d\omega + \gamma \int_{\omega} h d\omega = p_o \omega + \gamma \sin \int_{\omega} y d\omega \qquad (56)$$

де *y* – ордината площадки $d\omega$.

Інтеграл $\int_{\omega} y d\omega$ є статичним моментом змоченої поверхні фігури відносно вісі О-Х і дорівнює добутку площі цієї фігури на ординату центра тяжіння y_c, тобто $\int_{\omega} y d\omega = y_c \omega$. Підставивши отримане значення в рівняння (69) отримаємо:

$$P_{\substack{обс \\ пов}} = p_o \omega + \gamma \sin y_c \omega = p_o \omega + \gamma h_c \omega, \qquad (57)$$

де $h_c = y_c \sin\alpha$ – глибина занурення центра тяжіння площадки ω в рідині.

Якщо посудина відкрита і на вільній поверхні рідини діє атмосферний тиск, то на плоску стінку діятиме сила надлишкового тиску, яка визначається залежністю

$$P = \gamma h_c \omega, \qquad (58)$$

Таким чином, сила надлишкового тиску рідини на плоску довільно орієнтовану в просторі стінку дорівнює тискові в центрі ваги цієї стінки γh_c, помноженому на її площу ω.

Сила тиску на горизонтальне дно посудини з рідиною визначається за залежністю:

$$P = \gamma H \omega. \qquad (59)$$

де *H* – глибина рідини в посудині; ω – площа дна посудини.

Сила гідростатичного тиску напрямлена з боку рідини нормально до поверхні на яку діє тиск. Точка прикладення сили тиску Р називається ***центром тиску*** Т (див. рис. 10). Для знаходження ординати y_T положення центра тиску

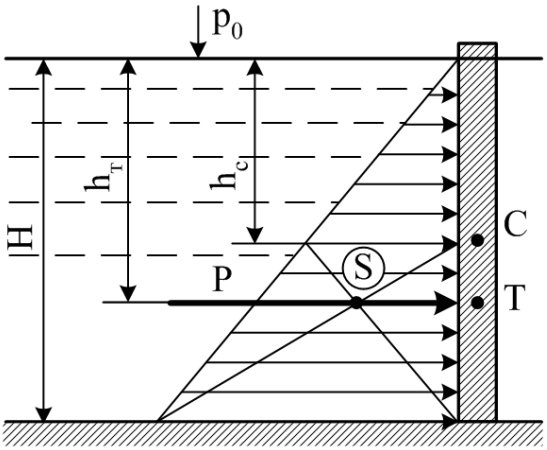

Рис. 11. Схема до графоаналітичного методу знаходження сили

скористуємося теоремою Варіньона, згідно з якою момент рівнодіючої, в нашому випадку сили P, дорівнює сумі моментів складових, тобто

$$Py_T = \int_\omega y dP$$

Звідси

$$y_T = \left(\int_\omega y dP \right) \Big/ P, \tag{60}$$

З врахуванням, що $dP = \gamma h_T \cdot d\omega = \gamma y_T \cdot \sin\alpha \cdot d\omega$ і $p = \gamma h_C \cdot \omega = \gamma y_C \cdot \sin\alpha \cdot \omega$ отримаємо:

$$y_T = \frac{\int_\omega y^2 d\omega}{y_c \omega} = \frac{J_x}{y_c \omega}, \tag{61}$$

де $J_x = \int_\omega y^2 d\omega$ – вісьовий момент інерції площі відносно вісі OX.

В розрахунках зручніше використовувати момент інерції змоченої частини плоскої стінки відносно вісі, що проходить через центр ваги паралельно вісі OX, тобто центральний момент інерції J_0. Зв'язок між J_0 і J_x, за теоремою Штейнера, описується формулою:

$$J_X = J_o + y_C^2 \omega \tag{62}$$

підставивши значення в формулу (74) одержимо:

$$y_T = \frac{J_o + y_C^2 \omega}{y_C \omega} = J_C + \frac{J_o}{y_C \omega} \tag{63}$$

У випадку вертикальної стінки

$$h_T = h_c + \frac{J_0}{h_c \omega}. \tag{64}$$

Формули для визначення центрального моменту інерції для плоских поверхонь різної форми наводиться в довідковій літературі. Наприклад, для прямокутника, для квадрата, для трикутника і т.д.

Графоаналітичним методом сила тиску P та положення центра тиску знаходиться за допомогою епюр гідростатичного тиску. Розглянемо окремий випадок визначення сили тиску цим методом при дії його на плоску вертикальну стінку завширшки b (рис. 11). Побудуємо епюру гідростатичного тиску.

Сила гідростатичного тиску за цією методикою визначиться залежністю

$$P = S \cdot b, \tag{65}$$

де S – площа епюри,

$$S = \frac{pgH^2}{2}, \qquad (66)$$

b – ширина щита (перпендикулярна площі рисунка).

Сила P пройде перпендикулярно площині стінки через центр ваги його епюри, який в цьому випадку буде знаходитись на перетині медіан трикутника, форму якого має епюра.

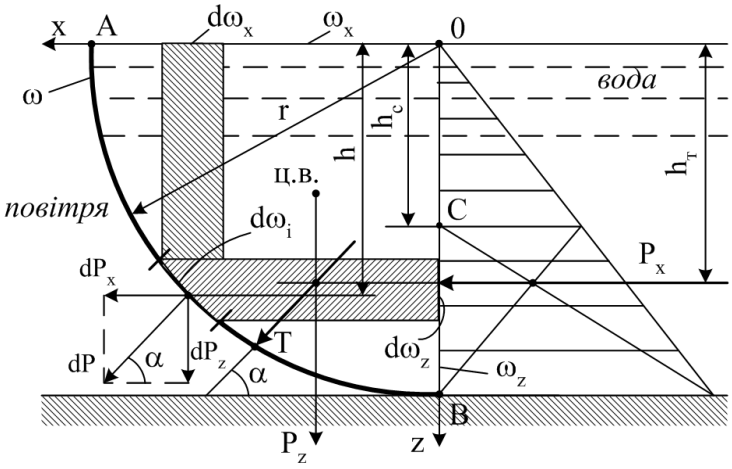

Рис. 12 Схема до визначення сили гідростатичного тиску на криволінійну поверхню.

Сила гідростатичного тиску при його дії на криволінійні поверхні.

Прикладами криволінійних поверхонь, застосування яких пов'язане з тиском рідин, є секторні, сегментні та вальцеві гідротехнічні затвори, сферичні кришки резервуарів, стінки баків, цистерн і ін.

При визначенні сили тиску на криволінійні поверхні застосовується метод знаходження складових її, а вже по ним – результуючої сили гідростатичного тиску. Обумовлено це тим, що в кожній точці криволінійної поверхні вектор тиску має свій напрямок, на відміну від попереднього випадку (плоских поверхонь), де вектори тиску паралельні між собою, а знаходження сили тиску зводиться до сумірування паралельних елементарних сил.

Для визначення сили тиску розглянемо криволінійну поверхню циліндричної форми площею ω і радіусом r , на яку рідина тисне з увігнутого боку (рис. 18). Координатні вісі приймемо – вісь ox суміщається з вільною поверхнею рідини, а вісь oz опустимо вниз. Виділимо на криволінійній поверхні елементарну полоску площею, $d\omega_i$ занурену в рідину на глибину h.

На неї діє елементарна сила dP, напрямлена перпендикулярно до елементарної полоски і під кутом α до горизонтальної площини, яка дорівнює

$$dP = \gamma h d\omega, \qquad (67)$$

Розкладемо її на складові горизонтальну dP_x і вертикальну dP_z і знайдемо їх.

$$dP_x = dP\cos\alpha = \gamma \cos\alpha h d\omega_i = \gamma h d\omega_z, \qquad (68)$$

де $\cos\alpha \cdot d\omega_i = d\omega_z$ – проекція полоски $d\omega_i$ на вертикальну площину.

Проінтегрувавши рівняння (68) по всій площі ω одержимо горизонтальну складову повної сили гідростатичного тиску.

$$P_x = \gamma \int_{\omega} h d\omega_z = \gamma h_c \omega_z, \qquad (69)$$

де $\int_{\omega} h d\omega_z = h_c \omega_z$ – статичний момент усієї проекції відносно вільної поверхні рідини; h_c - глибина занурення центра ваги проекція ω_z в рідині; ω_z - проекція криволінійної поверхні на вертикальну площину. У випадку, який розглядається це буде прямокутник.

Вертикальна складова

$$dP_z = dP \sin\alpha = \gamma \sin\alpha h d\omega_i = \gamma h d\omega_x, \qquad (70)$$

де $\sin\alpha d\omega_i = d\omega_x$ – проекції полоски $d\omega$ i, на горизонтальну площину.

Так як $h \cdot d\omega_x = dW_x$, тобто є об'ємом елементарної вертикальної призми (заштрихованої) то,

$$dP_z = \gamma dW \ . \qquad (71)$$

Таким чином, вертикальна складова буде

$$P_z = \gamma \int_w dW = \gamma W, \qquad (72)$$

де W – об'єм тіла тиску.

Тіло тиску, як видно із рисунка 12, є об'ємом, обмеженим вільною поверхнею рідини, криволінійною поверхнею та умовними вертикальними гранями з її торців.

Таким чином, вертикальна складова сили тиску на криволінійну поверхню P_z дорівнює вазі рідини в об'ємі тіла тиску і напрямлена в цьому випадку вниз. Якби рідина діяла на криволінійну поверхню з випуклого боку, то тіло тиску було б заповнене повітрям і P_z була б напрямлена уверх. Взагалі, тіло тиску заповнене рідиною називається дійсним, а заповнене повітрям – фіктивним, або тілом "випору".

Повна сила тиску P знаходиться як рівнодіюча горизонтальної і вертикальної складових

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_z^2}, \qquad (73)$$

де P_x і P_z – відповідно, горизонтальна і вертикальна складові сили P.

Положення центру тиску (точки Т) знаходиться як показано на рис. 12. Сила P пройде через точку перетину векторів складових P_x і P_z під кутом α до горизонтальної площини, тобто $tg\alpha = \frac{P_z}{P_x}$.

В свою чергу, вектор горизонтальної складової пройде горизонтально через центр ваги епюри гідростатичного тиску на проекцію ω_z (рис. 18.) (точка перетину медіан), а вертикальна складова пройде вертикально через центр ваги тіла тиску.

Рівновага рідин у сполучених посудинах

Сполученими називаються посудини, які з'єднані між собою гідролініями, або елементами конструкцій. Прикладами їх є декілька водонапірних башт в одній системі водопостачання і інші гідросистеми.

Розглянемо систему, яка складається з двох сполучених посудин, заповнених двома різними рідинами, які не змішується, а на вільній поверхні рідини в них діють тиски p_1 і p_2, які неоднакові між собою (рис. 13).

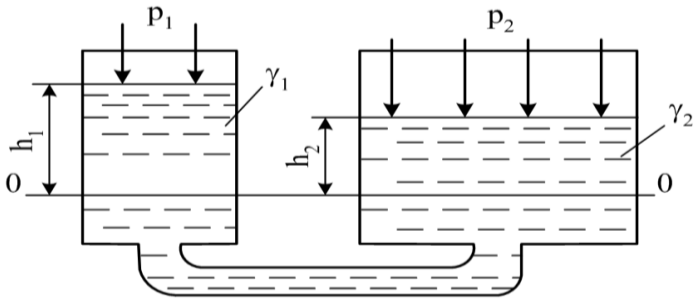

Рис. 13 Схема двох сполучених посудин

Питома вага рідин також різна – в першій посудині γ_1, а в другій – γ_2.

Приймемо площину порівняння О-О на рівні поверхонь розділу рідин, тоді положення вільних поверхонь рідини в посудинах відносно неї будуть h_1 і h_2.

Згідно з основним рівнянням гідростатики тиск в любій точці рідини на рівні площини порівняння в першій посудині буде $p = p_1 + \gamma_1 h_1$, а в другій $p = p_2 + \gamma_2 h_2$. Оскільки система (рідина) знаходиться в рівновазі то ці тиски будуть однаковими, тобто

$$p_1 + \gamma_1 h_1 = p_2 + \gamma_2 h_2. \qquad (74)$$

Якщо посудини відкриті то тиск на вільній поверхні рідин в обох посудинах буде однаковим і дорівнюватиме атмосферному. Тоді з рівняння (74) отримаємо

$$\frac{\gamma_1}{\gamma_2} = \frac{h_1}{h_2}. \qquad (75)$$

Таким чином, в двох сполучених посудинах з однаковим тиском на вільній поверхні рівні рідини відносно площини порівняння будуть зворотньопропорційними питомим вагам цих рідин.

Якщо $p_1 \neq p_2$, а $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma$ з рівняння (74) одержимо $p_1 - p_2 = \gamma(h_2 - h_1)$, тобто різниця тисків на вільній поверхні рідини в сполучених посудинах визначається вагою стовпа рідини, висота якого дорівнює різниці висот стовпів рідини в кожній посудині відносно площини порівняння.

При $p_1 = p_2$ і $\gamma_1 = \gamma_2$ згідно з рівнянням (74) отримаємо $h_1 = h_2$, тобто однорідна рідина в сполучених посудинах при однаковому тискові на вільних поверхнях її встановлюється на одному рівні.

Закон Паскаля

Закон Паскаля формулюється так: – тиск на поверхню рідини, який здійснюється зовнішніми силами, передається рідиною однаково в усі напрямки.

Для обґрунтування цього розглянемо посудину наповнену рідиною (рис. 14). На вільній поверхні рідини за допомогою поршня 2, який знаходиться в положенні I-I, створено тиск p_0. У відповідності з цим, абсолютний тиск в точці А буде $p_A = p_o + \rho gh$.

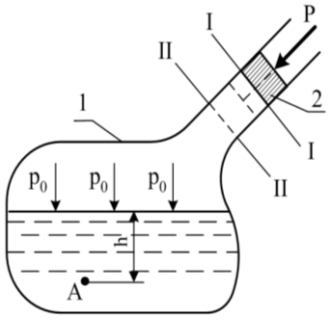

Рис. 14 Схема до обґрунтування закону Паскаля: 1 – посудина з рідиною; 2 – поршень; I-I і II-II - початкове і кінцеве

Перемістимо поршень з положення I-I в положення II-II. Тиск на вільній поверхні рідини в посудині збільшиться на величину Δp, який буде дорівнювати $\Delta p = P_{II}/\omega_п$, де P_{II} – додаткова сила прикладена до поршня при його переміщенні з положення I-I в положення II-II; $\omega_п$ - площа поршня.

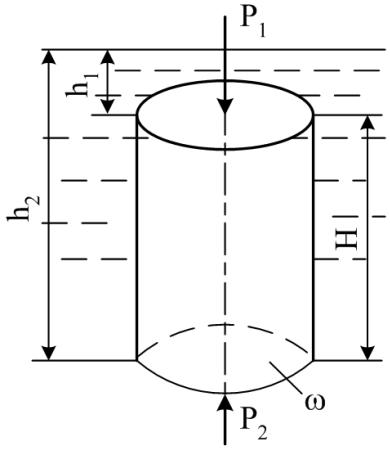

Рис. 15 Схема до обґрунтування закону

Загальне значення тиску на вільній поверхні буде $p_o + \Delta p$, а абсолютний тиск в точці А буде $p_{AII} = p_o + \Delta p + \rho gh$. Враховуючи, що зовнішній тиск Δp значно більший за ваговий ρgh, останнім можна знехтувати, що суттєво не вплине на точність значень величин і тиск $p_{AII} = p_o + \Delta p$, тобто він не буде залежати від місця розташування точки в рідині.

В цьому й полягає сутність закону Паскаля, який широко застосовується при конструюванні і розрахунках різних гідростатичних механізмів, про що йтиметься нижче.

На використанні принципу закона Паскаля конструюються і працюють гідростатичні механізми.

5. Основи теорії плавання тіл. Закон Архімеда

Закон Архімеда формулюється так: – на занурене в рідину тіло діє виштовхуюча сила $P_в$, напрямлена знизу вгору, яка дорівнює вазі рідини витісненої тілом.

Для обґрунтування сказаного розглянемо занурене в рідину, що знаходиться у відкритій посудині циліндричної форми, тіло, яке знаходиться в стані рівноваги (рис. 15). Висота тіла H, а площа нижньої стінок циліндра та верхньої стінок циліндра ω. Діючі на бокову поверхню сили гідростатичного тиску взаємно врівноважуються і в розрахунках не враховуються. Таким чином, до уваги приймаються тільки сила ваги тіла і сили, які діють на верхню і нижню стінки.

І так, зверху на тіло діє занурююча (напрямлена зверху вниз) сила $P_1 = \omega\rho g h_1$, а знизу – виштовхуюча (напрямлена знизу вгору) сила $P_2 = \omega\rho g h_2$. Різниця цих сил буде виштовхуючою (підтримуючою) силою $P_в = P_2 - P$ Підставивши значення сил P_1 і P_2 отримаємо:

$$P_в = \omega\rho g h_2 - \omega\rho g h_1 = \omega\rho g(h_2 - h_1) = \rho g\omega H = \rho g W . \quad (76)$$

Тобто, виштовхуюча сила дорівнює вазі рідини виштовхуваної цим тілом

$$P_в = \gamma W , \quad (77)$$

де γ – питома вага рідини; *W*- об’єм тіла.

Вона напрямлена по вертикалі вгору і прикладена до тіла в точці, що відповідає центру тиска, яка називається центром водотонажності (точка В) (рис. 16). Вага рідини в об’ємі, що виштовхнуло занурене в неї тіло (див. рис. 16 а, б), або частини його (див. рис. 16, в) називається водотоннажністю плаваючого тіла.

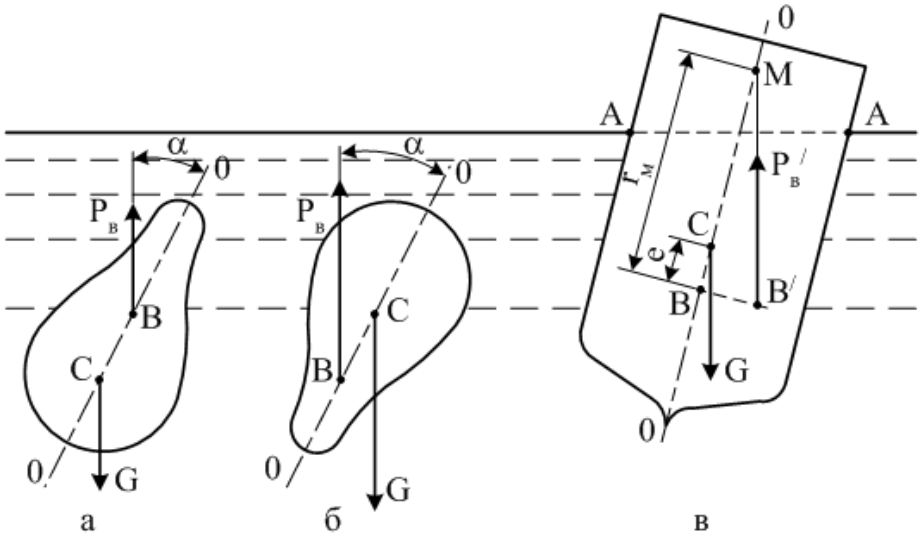

Рис. 16 Схеми до обгрунтування рівноваги плаваючих тіл.

Крім виштовхуючої (підтримуючої) сили $P_в$ на тіло, як зазначалося вище, діє сила його ваги G, яка завжди прикладена в центрі тяжіння тіла (точка С) і напрямлена вертикально вниз (див. рис. 16).

Співвідношення виштовхуючої сили і сили ваги складає основу теорії плавання тіл.

Зазначимо, що плавання тіл характеризується їх ***плавучістю***, тобто здатністю тіл зберігати положення рівноваги по відношенню до вільної поверхні рідини.

Якщо вага тіла $G > P_в$, то тіло тоне; при $G = P_в$ тіло буде знаходитися в стані спокою на любій глибині його занурення (підводне плавання, рис. 16, а); при $G < P_в$ тіло сплива до тих пір, поки частина його почне підніматися над поверхнею рідини і виштовхуюча сила зменшиться до значення $P_в = G$ (надводне плавання тіла, рис. 16, в).

На рис. 16 крім вищеназваних величин зазначені й такі: А-А - лінія

перетину вільної поверхні рідини з боковою поверхнею плаваючого тіла, вона ще називається ***ватерлінією***, а площина усередині тіла, обмежена ватерлінією, називається площиною плавання; О-О — вісь плавання, вона проходить через центр тяжіння тіла С. Для забезпечення рівноваги плаваючого тіла необхідно, щоб вісь плавання О-О була перпендикулярною до поверхні рідини, а центр водотоннажності В повинен розташовуватись на вісі плавання вище центра тяжіння С (див. рис. 16, а, б).

При плаванні на тіло можуть діяти сторонні явища — нерівномірність навантаження і ін. внаслідок чого тіло може відхилятися від положення рівноваги. У зв'язку з цим виникає поняття ***остійності*** плаваючого тіла, тобто здатності його відновлювати положення рівноваги після припинення дії сил, які вивели його зі стану рівноваги. На рис. 16, а показана остійна рівновага при підводному плаванні тіла, так як під дією моменту сил G і $P_в$, тіло, яке нахилене під кутом α повернеться проти годинникової стрілки і вісь плавання О-О займе вертикальне положення (α = 0). На рисунку 16, б показана не остійна рівновага при підводному плаванні тіла, так як під дією моменту сил G і $P_в$ тіло, нахилене під кутом α, буде продовжувати поворот за годинниковою стрілкою і кут α буде збільшуватися.

Розглянемо умови остійності судна (рис. 16, в). При відхиленні (крені) судна центр його тяжіння С не міняє місця положення, а центр водотоннажності В переміститься в положення $B^{/}$. Точка М перетину лінії дії сили $P_в$ з вісю плавання називається ***метацентром***. При положенні метацентра М вище центра тяжіння С (r > e, де r – метацентричний радіус; e - ексцентриситет) плавання буде остійним (див. рис. 16, в), так як при крені судна момент сил G і $P^{/}_в$, прагнутиме відновити первісне положення судна. При положенні метацентра нижче центра тяжіння плавання буде неостійним, так як момент сил G і $P_в$ сприятиме збільшенню крена судна.

Питання для самоконтролю до лекції №2.

1. Від яких величин залежить абсолютний тиск?
2. Назвіть види гідростатичного тиску.
3. Які види рівноваги рідин існують в інженерній практиці?
4. Що визначається за допомогою основного рівняння гідростатики?
5. Сформулювати властивості гідростатичного тиску?
6. Якими приладами вимірюють надлишковий тиск?
7. Що таке гідростатичний напір?
8. Що таке п'єзометрична та вакуумметрична висота?
9. Яка основна одиниця тиску в системі СІ?