

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ВНУТРІШНІХ СПРАВ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ**

Циклова комісія аеронавігації

ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ

навчальної дисципліни

«Гідравліка та гідропневмопристрої авіаційної техніки»

обов'язкових компонент

освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

Технічне обслуговування та ремонт повітряних суден і авіадвигунів

за темою № 2 - «Основи гідростатики»

Харків 2022

ЗАТВЕРДЖЕНО

Науково-методичною радою
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 30.08.2022 № 8

СХВАЛЕНО

Методичною радою Кременчуцького
льотного коледжу Харківського
національного університету
внутрішніх справ
Протокол від 22.08.2022 № 1

ПОГОДЖЕНО

Секцією науково-методичної ради
ХНУВС з технічних дисциплін
Протокол від 29.08.2022 № 8

Розглянуто на засіданні циклової комісії аеронавігації протокол від
15.08.2022 № 1

Розробник: викладач циклової комісії аеронавігації, проф., к.т.н.
Павленко О. В.

Рецензенти:

1. Викладач Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ, к. т. н., с. н. с., спеціаліст вищої категорії, викладач-методист Тягній В. Г.

2. Доцент кафедри автомобілів і тракторів Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського, к.т.н., Черненко С. М.

План лекції

1. Гідростатичний тиск і його основні властивості.
2. Основне рівняння гідростатики.
3. Закон Паскаля і його практичне використання.
4. Методи визначення гідростатичного тиску.
5. Дія сили тиску на плоску стінку посудини.
6. Дія сили тиску на криволінійну поверхню стінки.
7. Тиск рідини на стінки трубопроводів, методика розрахунку труб на міцність.
8. Закон Архімеда і його практичне використання в гідравліці.
9. Поняття про плавучість і остійність тіл в рідині.
10. Відносна рівновага рідини в посудині при її рівномірному прямолінійному і обертальному русі.

Рекомендована література:

Основна література

1. Федорець В.О., Педченко М.Н., Федорець О.О. Технічна гідромеханіка. Гідравліка та гідропневмопривод. Підручник. Житомир.: ЖІТІ, 1998. – 412 с.
2. Кулінченко, В. Р. Гідравліка, гідравлічні машини і гідропривід: підручник / В. Р. Кулінченко. — Київ: ІНК ОС, Центр навчальної літератури, 2006. - 616 с.
3. Рогалевич Ю.П. Гідравліка / Ю.П. Рогалевич. — К. : Вища шк., 1993. — 255 с.
4. Холоменюк М.В. Насосні та вентиляторні установки. — Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2005. — 330 с.
4. Навроцький Б. І. Механіка рідин : [підруч. для техн. вузів] / Б.І. Навроцький, Є. Сухін. — К. : ДІА, 2003. — 416 с.
5. Гідравліка та гідропривод: збірник задач і вправ : навч. посіб./ Л. В. Возняк, Р. Ф. Гімер, П. Р. Гімер [та ін.]. - Івано-Франківськ: Факел, 2018. - 283 с.

Допоміжна література

6. Расчет, проектирование и эксплуатация объемного гидропривода : учеб. пособие для студ. вузов / З.Л. Финкельштейн, О.М. Яхно, В.Г. Чебан и [др.]. — К.: КПИ, 2006. — 216 с.
7. Мандрус В.І., Лендїй Н.П. Машинобудівна гідравліка. Задачі та приклади. Навчальний посібник. Львів:, Світ, 1995.-264с.
8. Промисловий гідропривод : Практичний poradник / З.Л. Фінкельштейн, О.М. Яхно, І.С. Корощупов, К.С. Коваленко ; м-во освіти і науки, молоді та спорту України. ДонДТУ.НТУУ "КПІ". — Алчевськ : ДонДТУ ; К. : НТУУ "КПІ", 2012. — 176 с.
9. Башта Т.М. Надежность гидравлических систем ВС. Учебник. М.: Транспорт, 1986.-279с.

10. Артемьева Т.В., Лысенко Т.М. Гидравлика, гидромашины и гидропневмопривод. Учебник. М.: Изд. Центр "Академия", 2006.-336 с.
11. Справочник по гидравлике / В. А. Большаков, Ю. М. Константинов, В. Н. Попов и др. — 2-е изд. — К.: Вища шк. Головное изд-во, 2004.
12. Мандрус В.І. Гідравлічні та аеродинамічні машини. Підручник. Львів:, "Магнолія -2006", 2007.-340 с.
13. Сидоренко В.П., Яхно О.М. Гідравліка і гідроприводи. Навчальний посібник. К.: Університет "Україна", 2007.-164 с.
14. Схиртладзе А.Г. Гидравлические и пневматические системы. Учебник. М.: Высш. шк., 2006.-534 с.
15. Свешников, А.Г. Станочные гидроприводы / А.Г. Свешников. – М.: Машиностроение, 2004. – 512 с.
16. Металлорежущие станки : учеб. пособие для вузов. – М.: Машиностроение, 1990. – 500 с.
17. Д.Ю. Воронов, В.В. Волосков, А.О. Драчев, О.В. Бойченко. Гидроцилиндры: учеб.-метод. пособие / Д.Ю. Воронов [и др.]. – Тольятти : ТГУ, 2011. – 72 с.
18. Левицький Б. Ф. Гідравліка. Загальний курс / Б. Ф. Левицький. Н. П. Лещій. — Львів: Світ, 1994. — 264 с.
19. Гідравліка, гідро- та пневмопривод. Навчально-методичний посібник для студентів інженерних спеціальностей ЗДІА/ Укл. В.К. Тарасов, О.В. Новокщона. Запоріжжя: Видавництво ЗДІА, 2010. - 132 с.

Текст лекції

1. Гідростатичний тиск і його основні властивості.
2. Основне рівняння гідростатики.
3. Закон Паскаля і його практичне використання.
4. Методи визначення гідростатичного тиску.
5. Дія сили тиску на плоску стінку посудини.
6. Дія сили тиску на криволінійну поверхню стінки.
7. Тиск рідини на стінки трубопроводів, методика розрахунку труб на міцність.
8. Закон Архімеда і його практичне використання в гідравліці.
9. Поняття про плавучість і остійність тіл в рідині.
10. Відносна рівновага рідини в посудині при її рівномірному прямолінійному і обертальному русі.

1. Гідростатичний тиск і його основні властивості.

Поняття про гідростатичний тиск

Гідростатикою називається розділ гідравліки, в якому розглядаються закони рівноваги рідини, що знаходиться в нерухомому стані і їх практичне використання при вирішенні інженерних задач. Так як в нерухомих рідинах не діють дотичні сили, тому, на нерухому рідину діють тільки сили нормального тиску.

Гідростатичним тиском називається стискує напруження, що виникає всередині нерухомої рідини.

У загальному випадку під тиском розуміється фізична величина, яка характеризує інтенсивність впливу нормальних сил тиску з якими одне фізичне тіло діє на поверхню іншого.

Якщо на фізичному тілі виділити площину по розділу АВ і прикласти до елементарного площадки dS елементарну силу dP , то отримаємо елементарне напруження, яке називається гідростатичним тиском p . (рис 2.1).

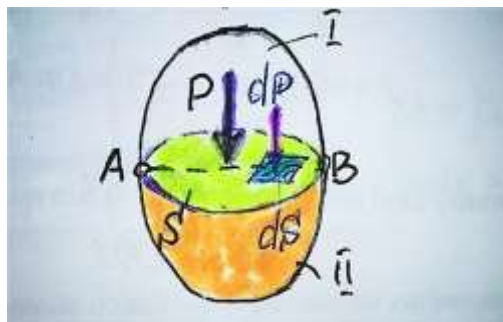


Рисунок. 2.1 Схема виникнення гідростатичного тиску

$$p = \lim_{dS \rightarrow 0} \frac{dP}{dS}, \frac{H}{m^2}$$

Таким чином, в нерухомій рідині можливий лише один вид напружень - напруження стиснення (стискання), тобто гідростатичний тиск.

Властивості гідростатичного тиску

Гідростатичний тиск має три характерні риси (рис. 2.2):

- гідростатичний тиск діє по нормалі всередину об'єму рідини;
- гідростатичний тиск не залежить від орієнтації площадки в просторі, на яку воно діє, тобто не залежить від кутів її нахилу;
- гідростатичний тиск в точці залежить від її положення в просторі, тобто від її координат в просторі.

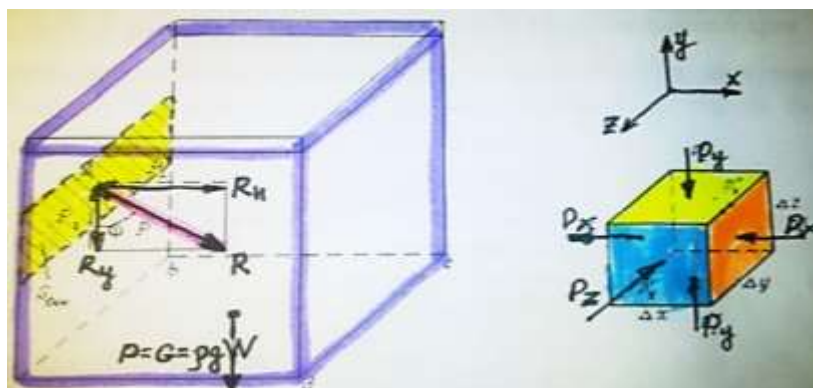


Рисунок 2.2 Схема, що ілюструє властивості гідростатичного тиску

2. Основне рівняння гідростатики

Розглянемо найпоширеніший випадок рівноваги рідини, що знаходиться у вертикальному циліндричній посудині, коли вона знаходиться в спокій під дією сили тяжіння і зовнішнього тиску на її вільної поверхні, і отримаємо рівняння рівноваги, що дозволяє визначати гідростатичний тиск в будь-якій точці розглянутого об'єму рідини (рис. 2.3). Визначимо гідростатичний тиск p в довільно взятій точці M , розташованій на глибині h .

Виділимо близько точки M елементарну площадку dS і побудуємо на ній вертикальний циліндричний обсяг висотою h і розглянемо умову рівноваги для нього.

Запишемо суму сил, що діють на даний об'єм в проекції на вертикальну вісь:

$$p \cdot dS - p_0 \cdot dS - \rho g \cdot dS = 0$$

Скоротивши вираз на dS і перегрупувавши члени, отримаємо

$$p = p_0 + \rho gh \quad (2.1)$$

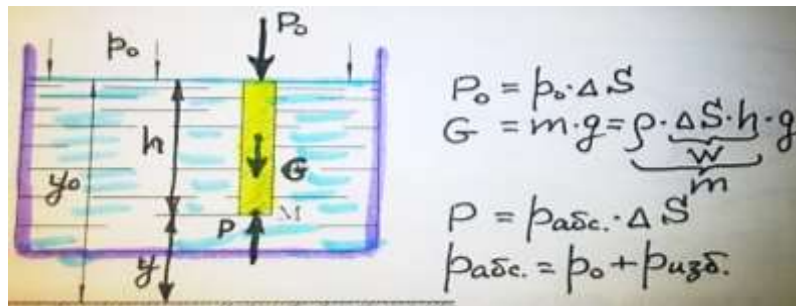


Рисунок 2.3 Схема для виведення основного рівняння гідростатики

Отримане рівняння називається основним рівнянням гідростатики, за допомогою нього можна визначити тиск в будь-якій точці спочиває рідини. Цей тиск складається з двох величин: тиску p_0 на зовнішній поверхні рідини і тиску, обумовленого вагою верхніх шарів рідини $p_{ізб} = \rho gh$.

$$p = p_0 + \rho gh$$

Таким чином, абсолютний тиск ($p_{абс.}$) в будь-якій точці нерухомої рідини дорівнює сумі зовнішнього тиску (p_0) і надлишкового тиску ($p_{над.}$), викликаного силою тяжіння стовпчика рідини, розташованого над точкою вимірювання т.М (рис 2.4).

$$p_{абс.} = p_0 + p_{над.}$$

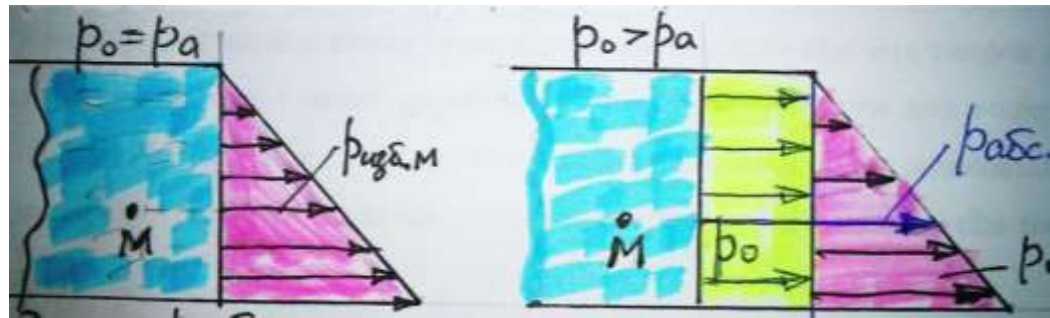


Рисунок 2.4 Схеми побудови епюр тиску на стінках судин

Поверхня, у всіх точках якої тиск однаковий, називається поверхнею рівня (або лінією рівного тиску). В даному випадку поверхнями рівня є горизонтальні площини.

Візьмемо на довільній висоті горизонтальну площину порівняння, від якої вертикально будемо відраховувати координати (y). Позначимо через y координату точки M , через (y_0) координату вільної поверхні рідини і замінімо в попередньому рівнянні (h) на ($y_0 - y$), отримаємо:

$$y + \frac{p}{\rho g} = y_0 + \frac{p_0}{\rho g} \quad (2.2)$$

Так як точка M взята довільно, можна стверджувати, що для всього розглянутого нерухомого об'єму рідини справедливо рівняння:

$$y + \frac{p}{\rho g} = H = \text{const} \quad (2.3)$$

Рівняння (2.3) є іншим видом запису основного рівняння гідростатики: Сума висоти положення точки вимірювання тиску (y) і висоти стовпчика рідини над точкою вимірювання є величиною постійною для будь-якої точки в нерухомому об'ємі рідини $\frac{p}{\rho g}$ і дорівнює гідростатичному напору H .

Визначимо такі поняття, рис. 2.1

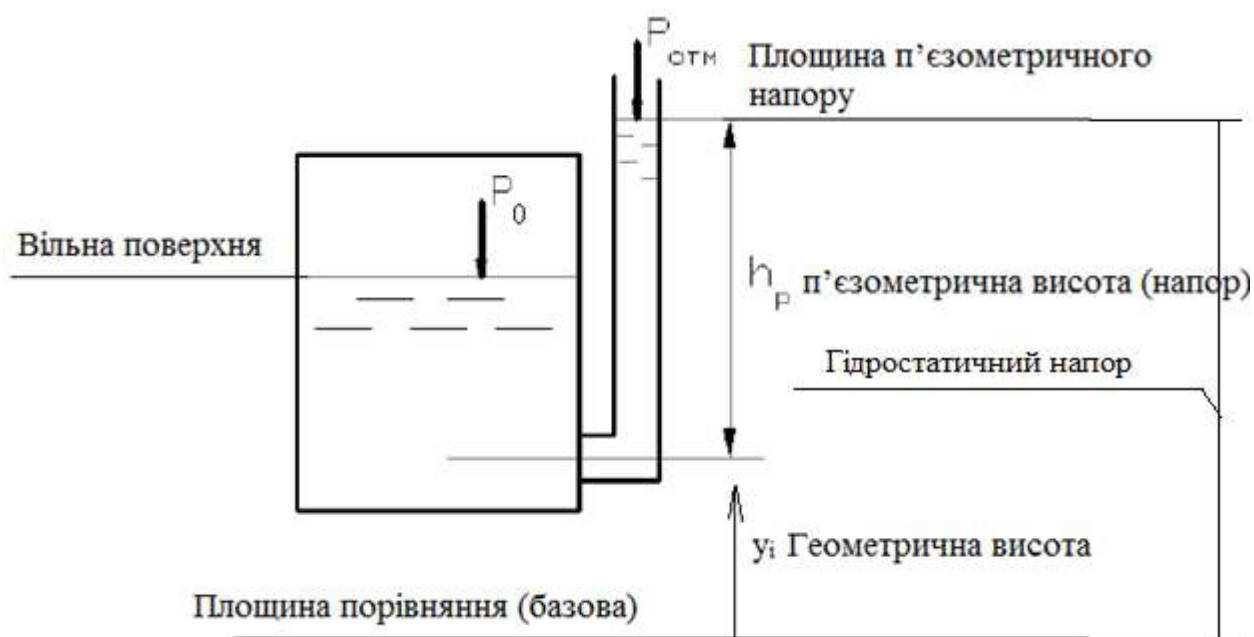


Рисунок 2.1 – Поняття

Вільна поверхня - це поверхня, що відокремлює рідину від газоподібного середовища.

Площина порівняння - це поверхня, щодо якої визначаються геометричні висоти положення площини вимірюваного тиску (0-0).

Відповідно до тиску може бути три варіанти

$$P_0 = P_{\text{атм}} \quad P_0 > P_{\text{атм}} \quad P_0 < P_{\text{атм}} \quad \text{рис. 2.2}$$

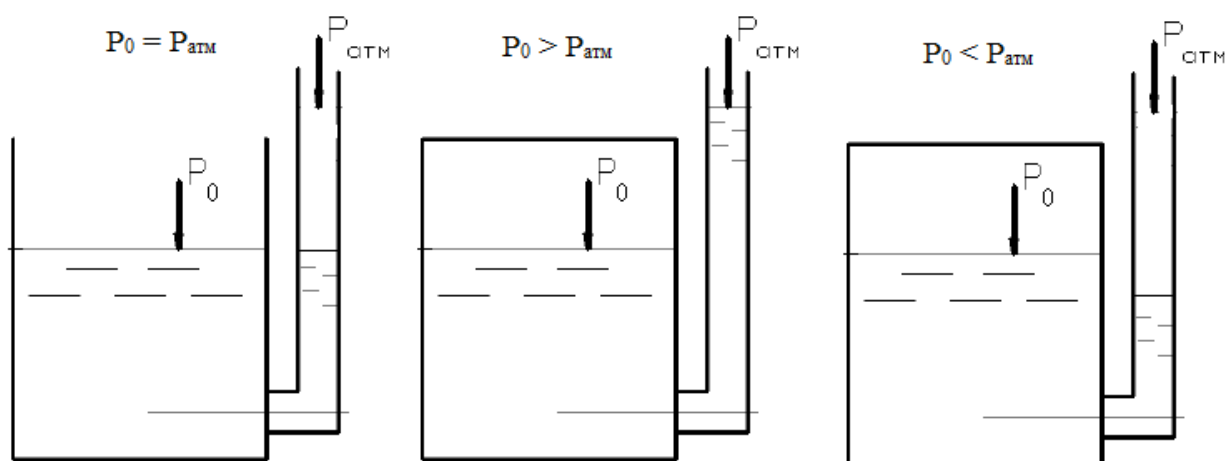


Рисунок 2.2 Показання п'єзометрів

3. Закон Паскаля і його практичне використання

Нехай в **т.1** тиск p_1 збільшилася на величину Δp . Якщо об'єм рідини не змінюється, то в **т.2** тиск p_2 також має збільшитися на величину Δp , згідно 2-гої властивості Паскаля (рис 2.6):

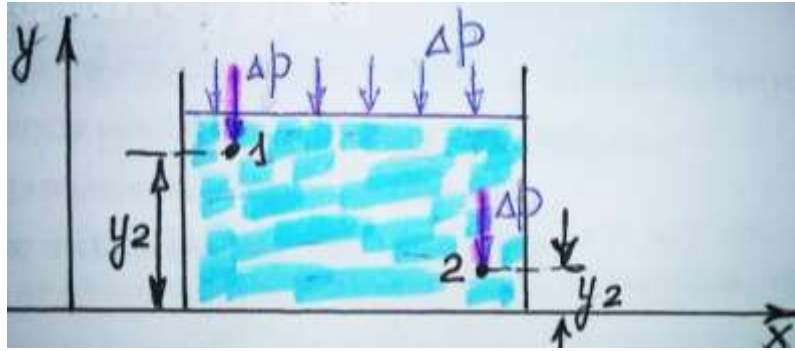


Рисунок 2.6 Схема для виведення закону Паскаля

$$y_1 + \frac{p_1}{\rho g} = y_2 + \frac{p_2}{\rho g}$$

Визначимо абсолютний тиск у різних точках в рідині, розташованих на різних глибинах (рис 2.7).

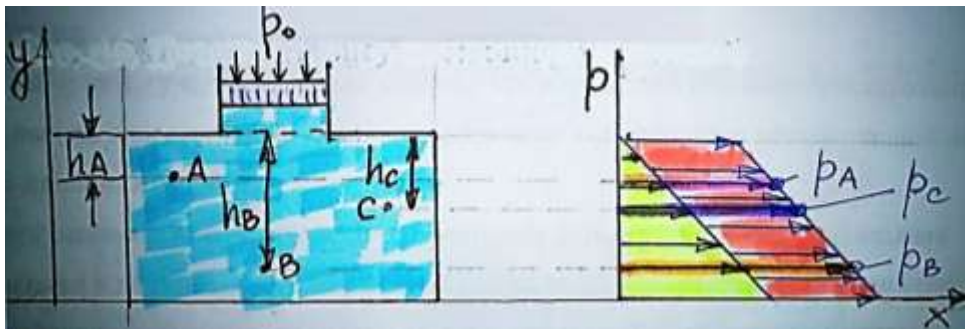


Рисунок 2.7 Схема дії тиску для різних точок вимірювання

$$m.A \rightarrow p_A = p_0 + \rho g h_A$$

$$m.C \rightarrow p_C = p_0 + \rho g h_C$$

$$m.B \rightarrow p_B = p_0 + \rho g h_B$$

Розподіл тиску з боку рідини на стінку AB:

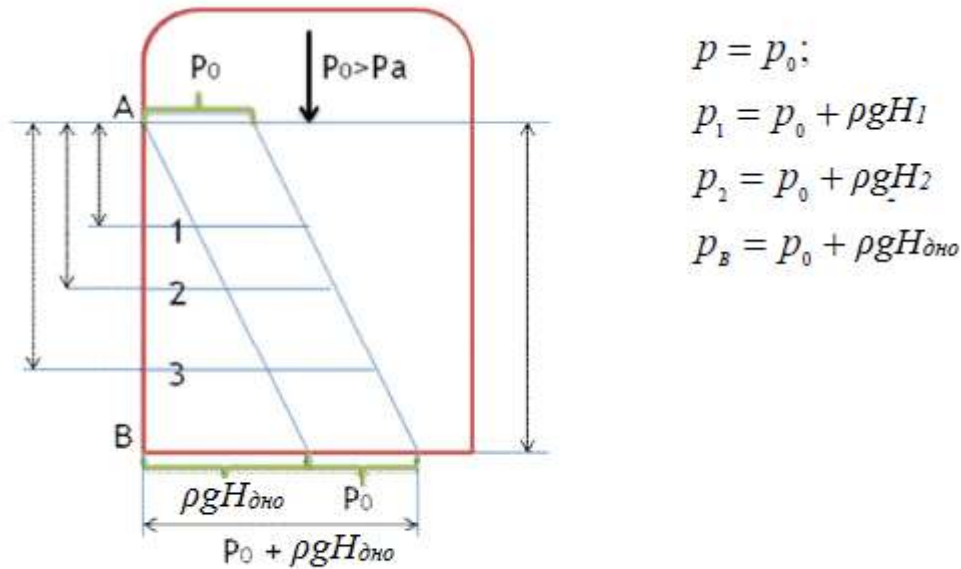


Рисунок 2.7 – Схема епюри абсолютного тиску

Для рідин, які знаходяться в герметичних сосудах з тиском $P_0 > P_a$, епюра на пласку поверхню має вид трапеції.

Епюра гідростатичного тиску для відкритих посудин на пласкі стінки має вид трикутника, основа якого дорівнює ρgh (рис. 2.2).

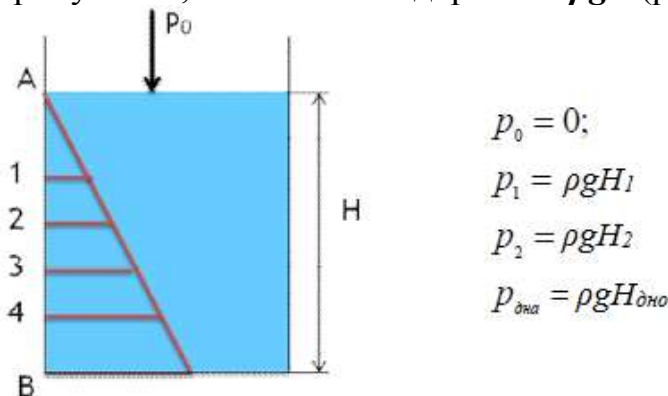


Рисунок 3.2 – Схема епюри гідростатичного тиску для відкритих посудин на пласкі стінки

Згідно основного рівняння гідростатики, абсолютний тиск в точках **A**, **C** і **B** буде різним і залежить від глибини занурення точок відносно вільної поверхні.

Формулювання Закону Паскаля: *будь-яке зміна тиску в довільній точці нерухомої рідини передається у всіх напрямках і впливає на всі точки об'єму рідини однаково.*

Таким чином, тиск в будь-якій точці нерухомої рідини залежить від глибини занурення точки і є однаковим для всіх точок знаходяться на однаковій глибині.

Епюри тиску – графічне представлення розподілу тиску уздовж будь-якого контуру чи поверхні, рис. 2.5

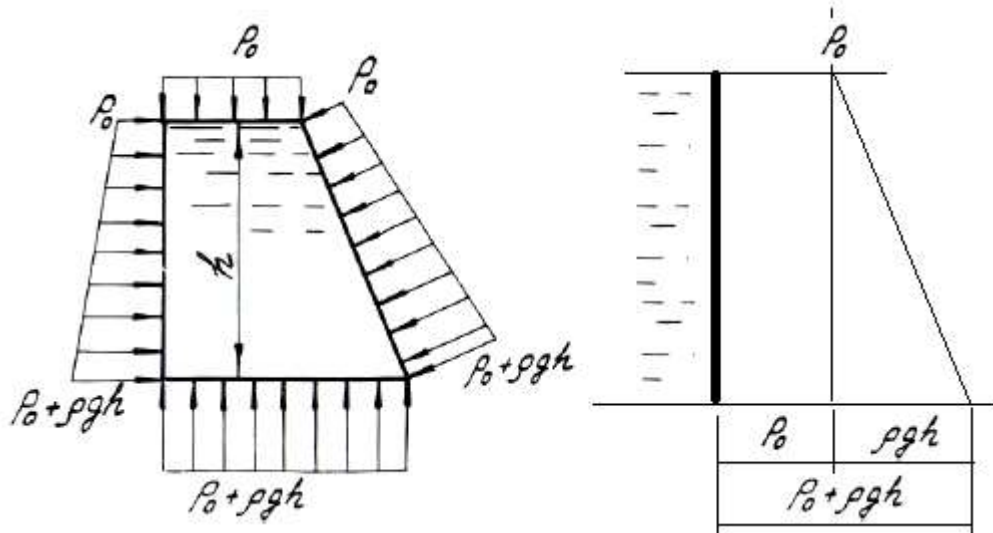


Рисунок 2.5. Епюри тиску на стінки

Тому, що є задачі із визначення сили від тиску рідини на бокові поверхні судів із рідиною

Практичне застосування закону Паскаля

1) Гідравлічний прес

Під впливом зовнішньої сили P_1 на малий поршень діаметром d в рідині виникає нормальний тиск p_1 (рис. 2.8). Так як, згідно закону Паскаля, тиск в нерухомій рідині передається у всіх напрямках і на однакову величину, то на великому поршні діаметром D виникає сила тиску $P_2 > P_1$:

$$p_1 = p_2$$

$$p_1 = \frac{P_1}{S_1}, \text{ де } S_1 = \pi * r^2$$

$$P_2 = p_1 * S_2, \text{ де } S_2 = \pi * R^2, \text{ тоді } \frac{P_1}{S_1} = \frac{P_2}{S_2}, \text{ звідси}$$

$$P_2 = P_1 * \frac{S_1}{S_2}, \text{ або } P_2 = P_1 * \left(\frac{D}{d}\right)^2$$

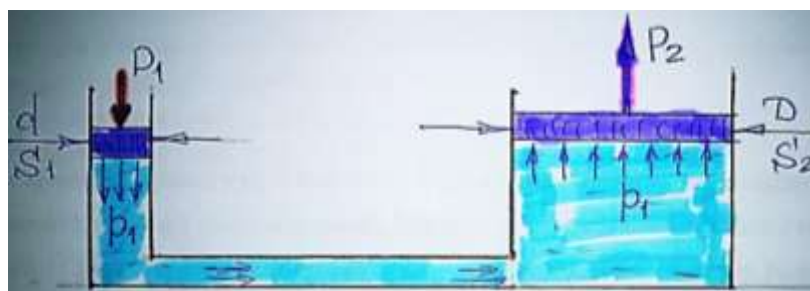


Рисунок 2.8 Схема установки гідропреса

2) Гідравлічний мультиплікатор

При підведенні тиску p_A в порожнину A , на поршні виникає сила P_A від тиску p_A (рис.2.9):

$$P_A = p_A \cdot S_A$$

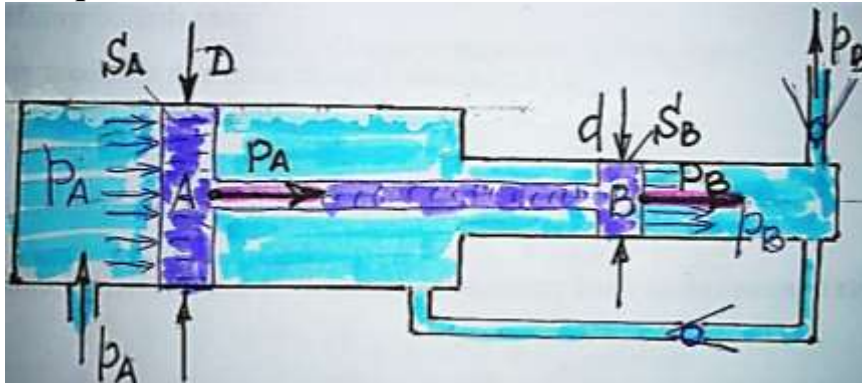


Рисунок 2.9 Схема установки гідравлічного мультиплікатора

Конструктивно на одному штоці знаходяться і великий і малий поршні, які мають діаметри D_A і d_B . Тому при переміщенні штока під дією сили P_A під малим поршнем B виникає тиск $p_B > p_A$, за однакової кількості сил $P_A = P_B$, тиск p_B буде більше тиску p_A , так як площа $S_B < S_A$, це означає:

$$p_B = \frac{P_B}{S_B}, \text{ або } p_B = p_A \left(\frac{D_A}{d_B} \right)^2,$$

4. Методи визначення гідростатичного тиску

Вимірювання тиску засноване на використанні основного рівняння гідростатики:

– для надлишкового тиску:

$$p_{абс} = p_a + p_{над} \quad \text{або} \quad p_{над} = p_{абс} - p_a$$

– для тиску розрідження (вакууму):

$$p_{абс} = p_a - p_{вак} \quad \text{або} \quad p_{вак} = p_a - p_{абс}$$

При вимірюванні тиску і вакууму прилади показують тільки надлишковий тиск ($p_{над.}$) і тиск вакууму ($p_{вак.}$).

Прилади вимірювання тиску

Умовно прилади поділяються на три групи:

- п'єзметри;
- манометри;
- вакууметри.

П'єзметри - це вимірювальні пристрої, що складаються зі скляної трубки діаметром до $d \approx 5 \text{ мм}$, під'єднується до резервуарів або трубопроводів у місцях вимірювання тиску (рис 2.10).

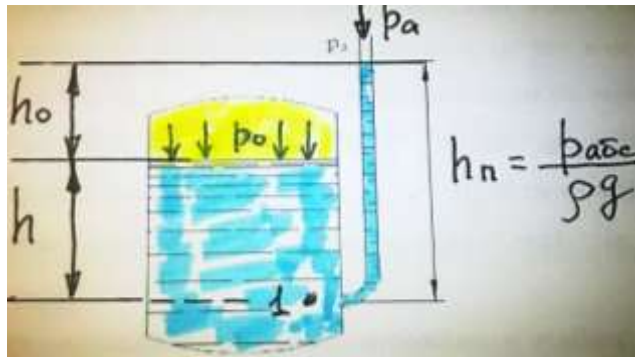


Рисунок 2.10 Схема вимірювання тиску п'єзометром

$$h_0 = \frac{p_0 - p_a}{\rho g}; \quad h = \frac{p_{изб}}{\rho g}$$

Складемо умову рівноваги щодо ***m.1***:

$$p_0 + \rho g h = p_a + \rho g h_n; \quad \rho g, \text{ звідси}$$

$$\frac{p_0}{\rho g} + h = \frac{p_a}{\rho g} + h_n, \text{ звідси}$$

$$h_n = \frac{p_0 - p_a}{\rho g} + h \text{ або}$$

$$h_n = h_0 + h.$$

П'єзометри дозволяють вимірювати гідростатичний тиск прямим вимірюванням і застосовуються для вимірювання тиску в лабораторних умовах до $p = 3 \text{ кПа}$.

Манометри - це рідинний або механічний пристрій, призначений для вимірювання надлишкового гідростатичного тиску.

Манометри по конструкції розрізняють на:

- рідинні;
 - механічні.
- 1) *рідинні манометри умовно поділяються на:*
- **U** - подібні;
 - чашкові;
 - диференційні

U - подібні манометри.

Вимірювальна трубка заповнюється ртуттю або іншою рідиною, що має більшу щільність, ніж щільність вимірюваної рідини (рис 2.11).

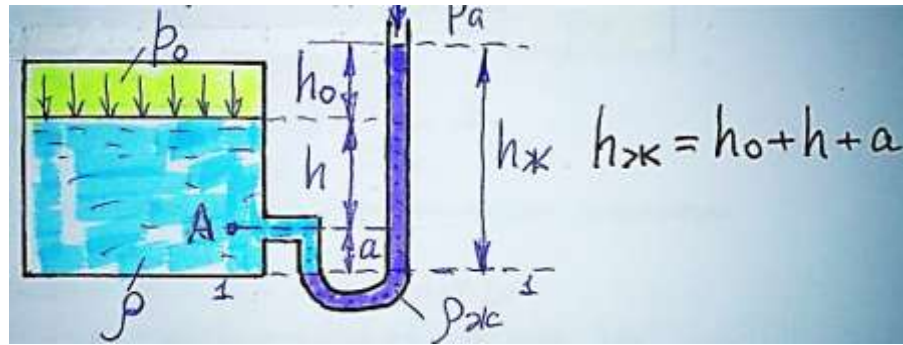


Рисунок 2.11 Схема установки U-подібного манометра

$h_{жс}$ - різниця рівнів рідини манометра в правому і лівому колінах трубки, мм;

a - різниця висот між місцем виміру тиску і поверхнею розділу рідини манометра і вимірюваної рідини, мм.

Складемо умову рівноваги рідини щодо базової лінії (1-1):

$$p_0 + \rho g (h + a) = p_a + \rho_{жс} g h_{жс}$$

$$p_0 + \rho g h = p_a + \rho_{жс} g h_{жс} - \rho g a \quad \text{або} \quad p_{абс.} = p_a + p_{над.}$$

Звідси:

$$p_0 = p_a + \rho_{жс} g h_{жс} - \rho g (h + a)$$

Чашоподібні манометри

Ртуттю заповнюється чашка манометра і прилад під'єднується до місця вимірювання (рис 2.12):

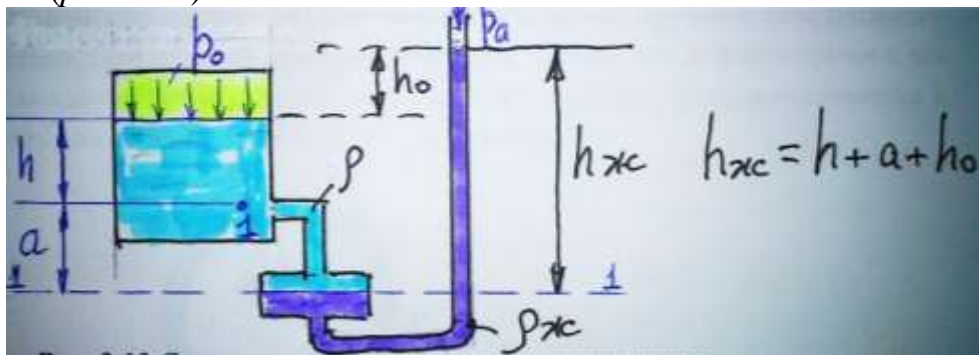


Рисунок 2.12 Схема установки чашечного манометра

Умова рівноваги рідин щодо площині (1-1)

$$p_0 + \rho g (h + a) = p_a + \rho_{жс} g h_{жс}$$

$p_{абс.1} = p_0 + \rho g h$ - зліва від чашечки манометра;

$p_{абс.1} = p_a + \rho_{жс} g h_{жс} - \rho g a$ - праворуч від чашечки манометра

звідси:

$$p_0 = p_a + \rho_{жс} g h_{жс} - \rho g (h + a)$$

Диференціальні манометри

Трубка приєднується двома кінцями до двох різних резервуарів, сама трубка заповнюється ртуттю або іншою рідиною, масової щільністю вище щільності вимірюваних рідин (рис 2.13).

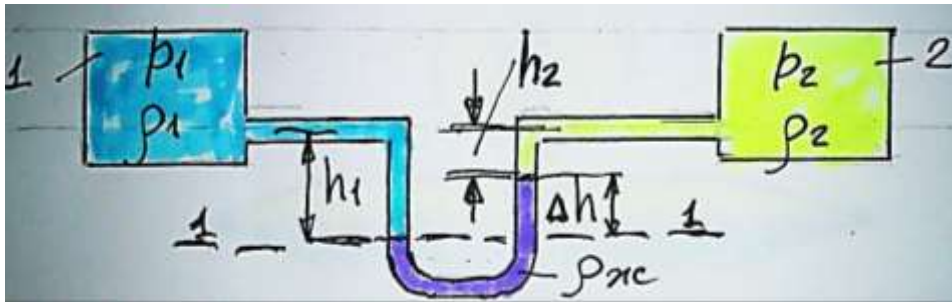


Рисунок 2.13 Схема установки диференціального манометра

Умова рівноваги щодо площини (1-1):

$$p_1 + \rho_1 g h_1 = p_2 + \rho_2 g h_2 + \rho_{жс} g \Delta h,$$

де $\Delta p = p_2 - p_1$

а) для випадку, коли $\rho_1 \neq \rho_2$

$$\Delta p = g (\rho_2 h_2 + \rho_{жс} \Delta h - \rho_1 h_1)$$

б) для випадку, коли $\rho_1 = \rho_2$

$$\Delta p = g \rho (h_2 - h_1) + g \rho_{жс} \Delta h$$

Диференціальні манометри призначені для вимірювання перепаду тиску в двох вимірюваних резервуарах (Δp).

2) *Механічні манометри умовно поділяються на:*

- пружинні;
- мембранні.

Пружинні манометри

Пружинні манометри складаються з герметичної пружинної трубки і передавального механізму зі стрілкою. При підведенні тиску в середину трубки, вона деформується і через передавальний механізм приводить в рух стрілку приладу, яка відхиляється і показує величину тиску по поділу шкали приладу (рис 2.14).

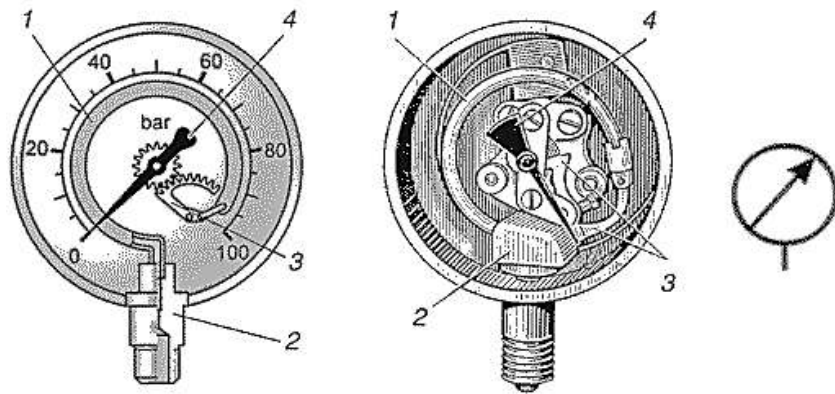


Рисунок 2.14 Схема установки пружинного манометра

Пружинні манометри дозволяють вимірювати тиск до $p = 1000 \text{ МПа}$.

Мембранні манометри

Мембранні манометри складаються з запаяної герметичної коробочки, еластичної мембрани і передавального стрілочного механізму (рис 2.15)

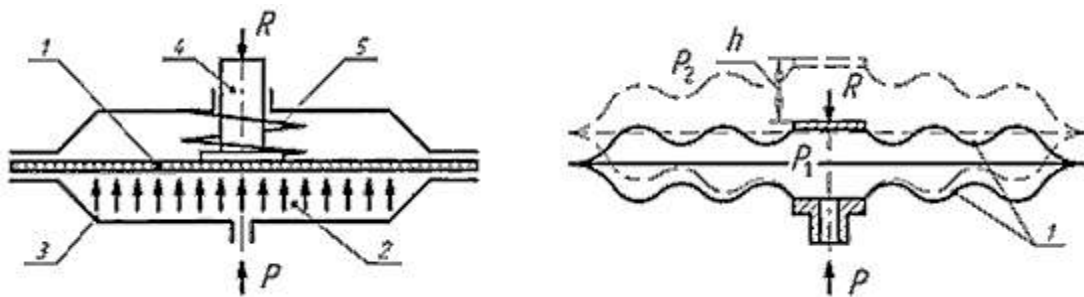


Рисунок 2.15 Схема установки мембранного манометра

Мембранні манометри дозволяють вимірювати тиск від 2 Па до 3 МПа .

Вакууметри - це технічні пристрої, які дозволяють вимірювати тиск розрідження. За принципом дії вакууметри поділяються на:

- рідинні;
- деформаційні;
- компресійні;
- теплові;
- електронні.

Ртутно-чашковий вакууметр. Принцип вимірювання вакууму аналогічний виміру тиску чашковим манометром (рис. 2.16). Рівняння рівноваги рівнів рідин в ртутно-чашковому приладі:

$$p_a = p_0 + p_{\text{вак}},$$

$$p_{\text{вак}} = \rho_{\text{ж}} g h_{\text{вак}}.$$

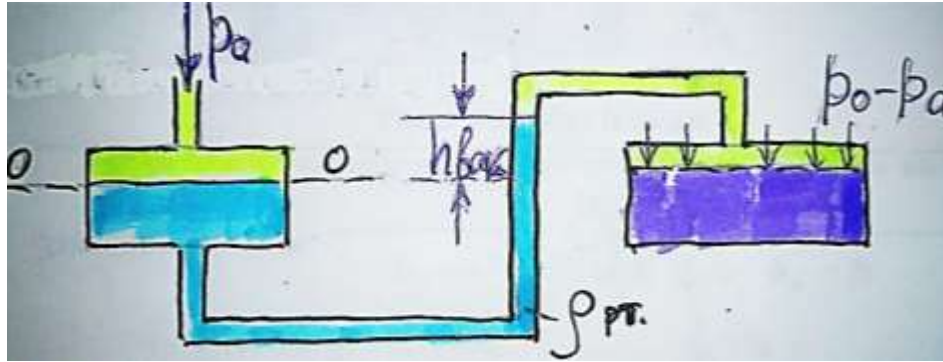


Рисунок 2.16 Схема установки ртутно-чашкового вакуумметра

Вимірювання п'єзометричної і вакууметричної висоти

Вимірювання п'єзометричної висоти (рис 2.17):

- 1) зовнішній тиск більше атмосферного ($p_0 > p_a$):

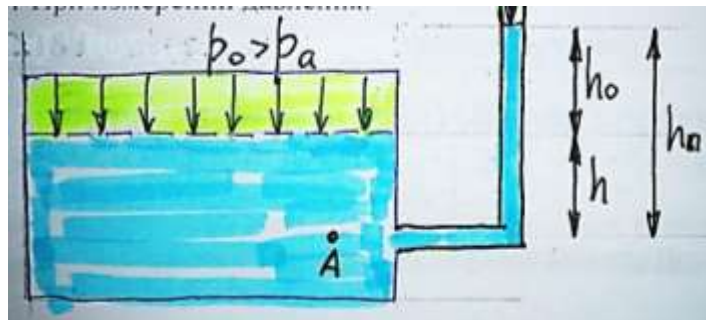


Рисунок 2.17 Схема установки для вимірювання тиску пьезометром

$$h_0 = \frac{p_0 - p_a}{\rho g}; \quad h = \frac{p_{\text{изб}}}{\rho g}; \quad h_n = \frac{p_{\text{абс}}}{\rho g}$$

$$h_n = h_0 + h.$$

З лівого боку т.А: $p_{\text{абс.А}} = p_0 + \rho g h$.

З правого боку т.А: $p_{\text{абс.А}} = p_a + \rho g h_n$, ... прирівнюємо праві частини двох рівнянь:

$$p_0 + \rho g h = p_a + \rho g h_n, \quad \text{звідси отримаємо}$$

$$h_n = \frac{p_0 + \rho g h - p_a}{\rho g}, \text{ або } h_n = \frac{p_{\text{абс}} - p_a}{\rho g}, \text{ або } h_n = \frac{p_0 - p_a}{\rho g} + h.$$

Таким чином, **п'єзометрична висота - це висота підйому рідини в п'єзометричній трубці відносно точки приєднання п'єзометра до резервуару.**

- 2) Зовнішній тиск дорівнює атмосферному ($p_0 = p_a$) (рис 2.18):

$$h_n = \frac{p_{\text{абс}} - p_a}{\rho g} + h, \text{ або } h_n = h.$$

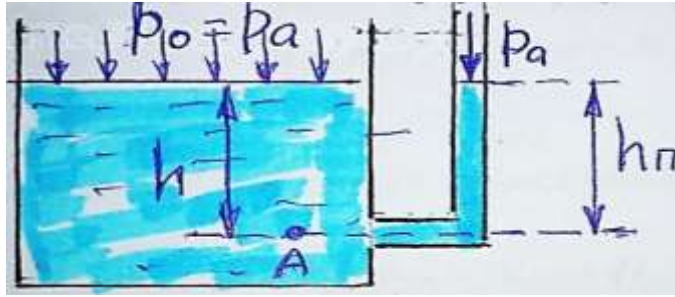


Рисунок 2.18 - Схема установки для вимірювання тиску п'єзометром

Вимірювання вакууметричної висоти (рис 2.19)

$$p_{\text{вак}} = p_a - p_{\text{абс}}$$

$$p_0 + \rho g h = p_a - \rho g h_{\text{вак}}, \text{ звідси}$$

$$h_{\text{вак}} = \frac{p_a - p_{\text{абс}}}{\rho g}, \text{ або } h_{\text{вак}} = \frac{p_a - p_0}{\rho g} - h$$

Таким чином, вакууметрична висота - це висота опускання рідини в вакууметричній трубці відносно точки приєднання до резервуару.

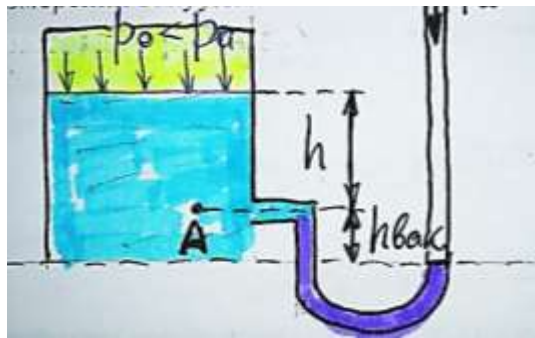


Рисунок 2.19 Схема установки для вимірювання вакууму

5. Дія сили тиску на плоску стінку посудини

У практиці часто потрібно знати, з якою силою рідина тисне на стінку судини і точку прикладання цієї сили. Отже необхідно визначати значення цієї сили і точку, куди прикладено рівнодіючу силу від сил тиску (див. Епюри тиску.)

Спочатку прости і наочний приклад – посудина кубічної форми, стінки вертикальні і плоскі.

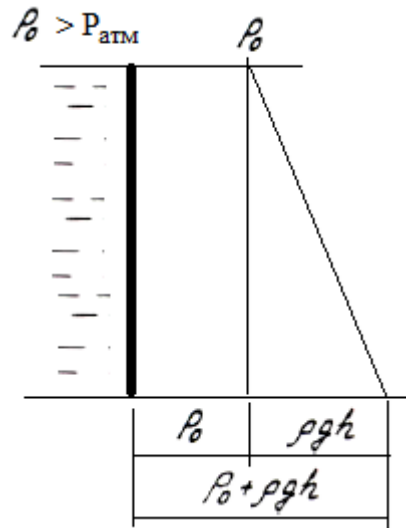


Рисунок 2.20 – Епюра тиску на вертикальну плоску стінку

Тиск p_0 викликає силу F_0 . Надлишковий тиск, викликаний стовпом рідини ρgh викликає силу $F_{\text{над}}$ (рос. $F_{\text{изб}}$). Це витікає із

$$F = pS = (p_0 + \rho gh)S = p_0S + \rho ghS = F_0 + F_{\text{над}}.$$

Так як зовнішній тиск p_0 , що діє на вільну поверхню, передається всім точкам площі S однаково (закон Паскаля), то його рівнодіюча сила F_0 буде прикладена в центрі ваги (ЦВ) фігури S .

Залишається визначити значення $F_{\text{над}} = \rho ghS$ і куди її прикладено з огляду на форму епюри тиску рідини.

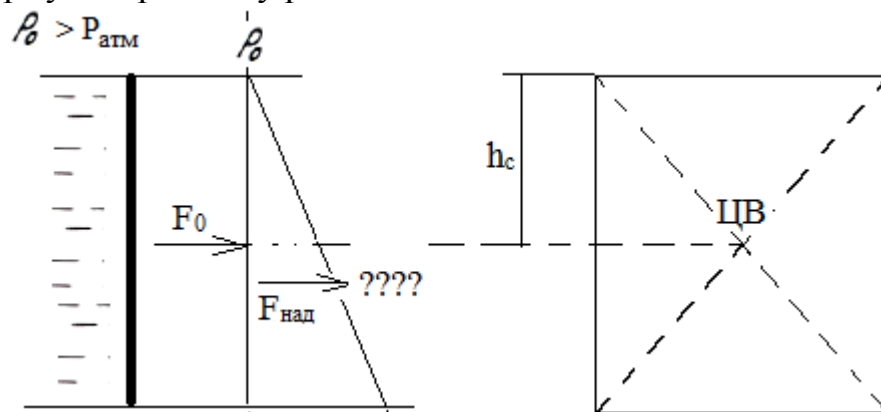


Рисунок 2.21 – Точки прикладення сил тиску

Спочатку числове значення сил від тиску.

Для визначення сили F від тиску використовуємо основне рівняння гідростатики $p_0 + \rho gh$.

Виразимо елементарну силу тиску dF , прикладену до нескінченно малої майданчику dS

$$dF = pdS = (p_0 + \rho gh)dS.$$

Для визначення повної сили тиску F проінтегруємо отриманий вираз по всій площі S , отримаємо

$$F = p_0 \int_S dS + \rho g \int_S h dS = p_0 S + \rho g \sin \alpha \int_S y dS.$$

Інтеграл $\int_S y dS$ є статичним моментом площі S відносно

осі x і дорівнює добутку площі фігури на координату центру ваги y_c , отже

$$\int_S y dS = y_c S.$$

Відповідно

$$F = p_0 S + \rho g \sin \alpha y_c S = p_0 S + \rho g h_c S = (p_0 + \rho g h_c) S = p_c S. \quad (2.32)$$

Тобто повна сила тиску рідини на плоску стінку дорівнює добутку площі стінки на гідростатичний тиск p_c в центрі ваги цієї площі.

А якщо розкрити дужки, то

$$F = p_0 S + \rho g h_c S.$$

де h_c – координата (висота, відстань, глибина) ЦТ.

Точка прикладання сили від надлишкового тиску $\rho g h_c$ це окреме питання. Точка прикладання сили $F_{\text{над}}$ розташована нижче центру ваги площі фігури.

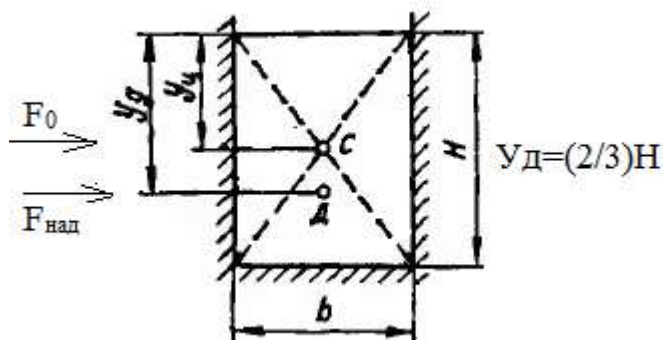


Рисунок 2.22 – Координати точок прикладення сил тиску

Це був простий приклад, призначений для розуміння, що діють дві сили і ці сили прикладаємо у різних точках бокової поверхні.

Тепер розглянемо загальний випадок визначення сил від тиску на бокову пласку поверхню – поверхня під кутом, рис. 2.23

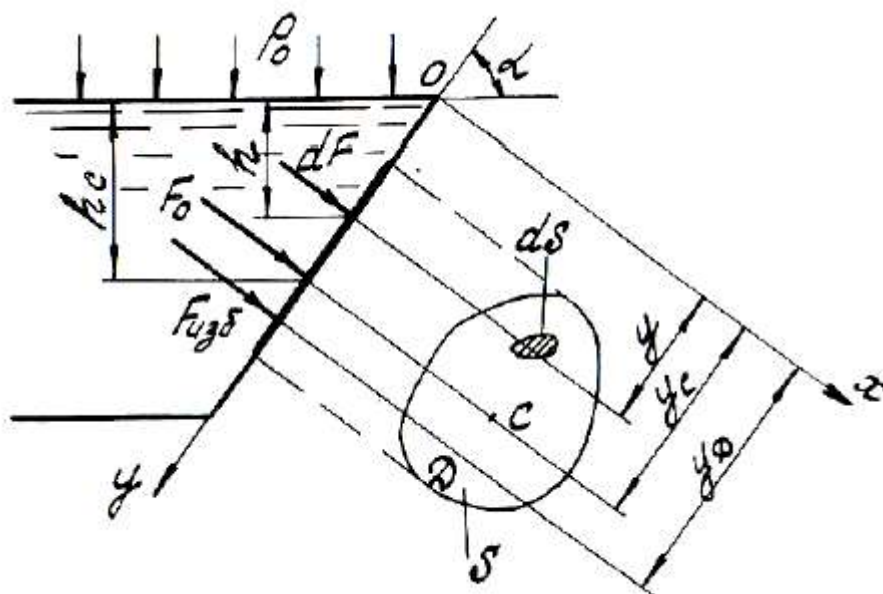


Рисунок 2.23 – Схема до розрахунку сил тиску

Наразі уже відомо усе, окрім координати точки y_d – точки, куди прикладено силу $F_{\text{над}} = \rho g h_c S$. Але знов запишемо вираз повної сили від тиску.

Знову виразимо елементарну силу dF від тиску, яку прикладено до нескінченно малої площадки dS :

$$dF = p dS = (p_0 + \rho g h) dS. \quad (2.30)$$

Пам'ятаємо, що $h = y \sin \alpha$.

Для визначення повної сили F від тиску інтегруємо отриманий вираз по площі S , отримаємо

$$F = p_0 \int_S dS + \rho g \int_S h dS = p_0 S + \rho g \sin \alpha \int_S y dS. \quad (2.31)$$

Інтеграл $\int_S y dS$ є статичним моментом площі S відносно

осі x і дорівнює добутку площі фігури на координату центру ваги y_c , отже

$$\int_S y dS = y_c S.$$

Відповідно,

$$F = p_0 S + \rho g \sin \alpha y_c S = p_0 S + \rho g h_c S = (p_0 + \rho g h_c) S = p_c S. \quad (2.32)$$

Тобто повна сила тиску рідини на плоску стінку дорівнює добутку площі стінки на гідростатичний тиск p_c в центрі ваги цієї площі.

Для знаходження точки прикладання сили надлишкового тиску $F_{\text{над}} = \rho g h_c S$ (Точка Д) скористаємося рівнянням механіки, згідно з якими момент рівнодіючої сили тиску щодо осі x дорівнює сумі моментів складових сил, тобто

$$F_{\text{изб}} y_D = \int y dF_{\text{изб}}.$$

Запишемо рівняння $F_{\text{изб}}$ і $dF_{\text{изб}}$:

$$F_{\text{изб}} = \rho g h_c S = \rho g y_c \sin \alpha S; \quad (2.34)$$

$$dF_{\text{изб}} = \rho g h dS = \rho g y \sin \alpha dS. \quad (2.35)$$

підставивши значення $F_{\text{изб}}$ і $dF_{\text{изб}}$ у рівняння (2.33) отримаємо

$$\rho g y_c \sin \alpha y_D = \int_S \rho g \sin \alpha y^2 dS. \quad (2.36)$$

Розв'язок відносно y_D :

$$y_D = \frac{\int_S y^2 dS}{y_c S} = \frac{I_x}{y_c S}, \quad (2.37)$$

де I_x - момент інерції площі фігури S відносно осі X .

Враховуючи, що $I_x = I_{\text{ох}} + y_c^2 S$, де $I_{\text{ох}}$ - момент інерції площі

фігури S відносно центральної осі, яка паралельна X , отримаємо

$$y_D = y_c + \frac{I_{\text{ох}}}{y_c S}. \quad (2.38)$$

Таким чином, точка прикладення сили $F_{\text{изб}}$ розміщена трохи нижче центра тяжіння площі фігури.

Якщо тиск 0 р дорівнює атмосферному ($p_0 = p_{\text{ат}}$) і впливає на стінку з обох сторін, то точка D і буде центром тиску і єдиним бо силу від $p_{\text{атм}}$ з буде компенсовано з обох боків стінки.

Чим більше p_0 , тим очевидно, центр тиску буде знаходитися ближче до центру тяжіння площі S .

6. Дія сили тиску на криволінійну поверхню стінки

Задача про силу тиску рідини на криволінійну поверхню в загальному випадку зводиться до визначення трьох складових сумарної сили тиску і трьох моментів. На практиці найчастіше доводиться мати справу з циліндричними або сферичними поверхнями, що мають площину симетрії. Тому буде трохи простіше – менше осей координат.

Визначення сили тиску в цьому випадку зводиться до визначення складових сил тиску по осях координат, а потім їх рівнодіючої.

Розглянемо посудину з рідиною, що має циліндричну поверхню AB , яка перпендикулярна площині креслення (рис. 2.24) і визначимо силу тиску рідини на цю поверхню. Виділимо об'єм рідини $ABCD$, обмежений розглянутої поверхнею AB , вертикальними поверхнями CB і AD і вільною поверхнею рідини. Покажемо діючі сили на виділений об'єм рідини і

розглянемо умови рівноваги виділеного об'єму рідини в вертикальному і горизонтальному напрямках.

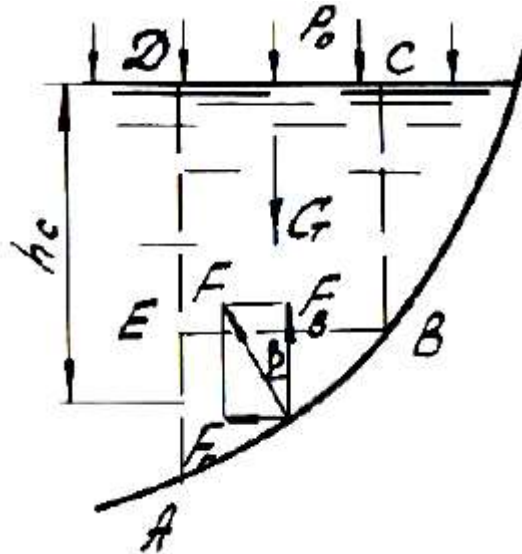


Рисунок 2.24 – Схема визначення сили тиску на округлу стінку

Запишемо умову рівноваги виділеного об'єму рідини (ABCD) у вертикальному напрямку:

$$p_0 S_{\Gamma} + G - F_B = 0,$$

де S_{Γ} – площа горизонтальної проекції поверхні AB;

$G = \rho g \bar{V}$ – сила ваги відокремленого об'єму рідини, тут V – об'єм рідини; – вертикальна складова сили тиску.

Із даного рівняння виділяємо

$$F_B = p_0 S_{\Gamma} + G. \quad (2.40)$$

Вертикальна складова сили тиску рідини на криволінійну стінку дорівнює силі тяжіння рідини в об'ємі V , званому тілом тиску, і силі тиску, що діє на вільну поверхню рідини.

Тіло тиску – це об'єм, обмежений розглянутою криволінійною стінкою, що змочено рідиною, вертикальної циліндричної поверхнею, проведеної через контур цієї стінки і горизонтальною площиною, проведеної з вільної поверхні рідини

Умова рівноваги того ж об'єму рідини в горизонтальному напрямку запишемо з урахуванням того, що сили тиску рідини на поверхні DE і CB взаємно врівноважуються і залишається лише сила тиску на поверхню AE, тобто

$$F_{AE} - F_{\Gamma} = 0, \quad (2.41)$$

де $F_{AE} = p_0 S_B + \rho g h_c S_B$ – сила від тиску рідини на поверхню AE, площа якої дорівнює площі вертикальної проекції поверхні AB – S_B , де h_c – глибина розміщення центра мас поверхні AE під рівнем вільної поверхні рідини.

Із рівняння рівноваги (2.41) витікає, що

$$F_{\Gamma} = p_0 S_B + \rho g h_{\Gamma} S_B. \quad (2.42)$$

Визначивши вертикальну і горизонтальну складові повної сили тиску, знайдемо цю силу:

$$F = \sqrt{F_B^2 + F_{\Gamma}^2}. \quad (2.43)$$

Кут напрямку β знаходиться із співвідношення $\operatorname{tg} \beta = \frac{F_{\Gamma}}{F_B}$:

$$\beta = \operatorname{arctg} \frac{F_{\Gamma}}{F_B}.$$

Випадок, коли рідина знаходиться під поверхнею

Коли рідина розташована знизу поверхні АВ (рис. 2.25), гідростатичний тиск у всіх точках поверхні АВ має ті ж значення, що і в попередньому випадку, але напрямки їх будуть протилежні.

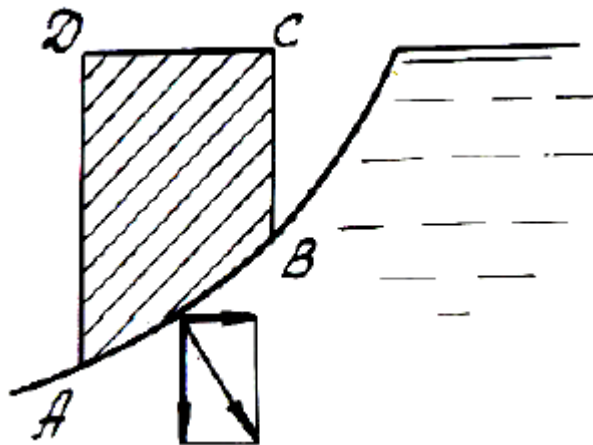


Рисунок 2.25 – Схема до розрахунку сили тиску на округлу стінку (випадок 20)

Сили F_B і F_{Γ} визначаються за формулами (2.40), (2.42), але спрямовані будуть протилежно. Під G розуміється сила ваги рідини в об'ємі, рівному ABCD, хоча і не заповненому рідиною.

7. Тиск рідини на стінки трубопроводів, методика розрахунку труб на міцність

Поняття про розрахунок стінок трубопроводу на міцність

Розглянемо поперечний переріз круглої труби на яке діє внутрішній гідростатичний тиск (p). Рівнодіюча сил тиску P прагне відірвати одну половину перерізу труби від іншої по лінії BC, тому в перерізі BC виникають сили опору матеріалу стінок трубки T (рис 2.25).

Сила тиску P на циліндричну поверхню труби (див. пункт про силу тиску на криволінійну поверхню) як добуток тиску на площу вертикальної проекції криволінійної поверхні

$$P = p * S = p * d * l,$$

$$S = d * l$$

Де d - внутрішній діаметр труби, м;

l - довжина відрізка трубки, м.

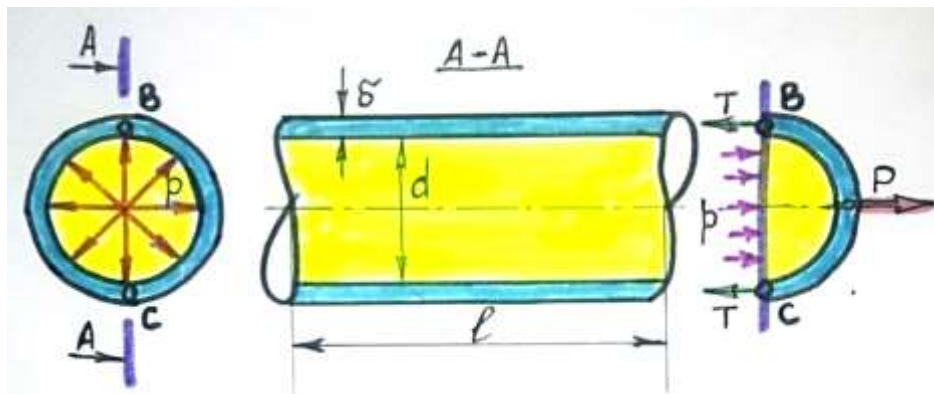


Рисунок 2.25 Розрахункова схема прикладення результуючої сили тиску на криволінійну поверхню труби

Сила опору матеріалу в перерізі BC дорівнює

$$T = [\sigma]_d * \delta * l.$$

де $[\sigma]_d$ - допустиме напруження міцності матеріалу, Па

δ - розрахункова товщина стінки трубки, м.

Складемо рівняння рівноваги в перерізі BC

$$P - 2T = 0.$$

$$p * d * l - 2 [\sigma]_d * \delta * l,$$

звідси товщина стінки труби

$$\delta = \frac{p * d}{2 [\sigma]_d}.$$

Фактична товщина стінки повинна бути більшою чим розрахункова на величину компенсації на корозію:

$$\delta_{\phi} > \delta + \delta_k$$

де δ_k - додаткова товщина стінки для компенсації корозії, м.

Розрахунок тонкостінних труб

Тонкостінними є труби, для яких відношення зовнішнього діаметра до товщини стінки трубопроводу становить $\frac{D}{\delta} \geq 16$.

Розрахункова товщина стінок тонкостінних труб розраховується за формулою:

$$\delta = \frac{p_{\max} * (D + m)}{2 [\sigma]_d},$$

де p_{\max} - максимальний тиск рідини, Па;

D -зовнішній діаметр трубопроводу, м;

m - граничне відхилення зовнішнього діаметра трубопроводу від номінального розміру, м. Приймається за стандартами на сортамент труб.

$[\sigma]_d$ - допустиме напруження матеріалу труби, Па

$$[\sigma]_d = \frac{\sigma_B}{n_B},$$

де σ_B - допустиме напруження міцності матеріалу труби, Па;

n_B - коефіцієнт запасу міцності матеріалу труби ($n = 3 \dots 6$);

δ_k - додаткова товщина стінки для компенсації корозії, мм.

$$\delta_\phi > \delta + \delta_k.$$

Розрахунок товстостінних труб

Розрахункова товщина товстостінних труб визначають за формулою Ламе (Формулу Ляме застосовують в основному для розрахунку циліндрів з крихких матеріалів.)

$$\delta \geq \frac{d}{2} \left(\sqrt{\frac{[\sigma]_d + p}{[\sigma]_d - p}} - 1 \right)$$

де d - внутрішній діаметр труби, м;

$[\sigma]_d$ - допустиме напруження розтягу матеріалу, Па;

$p = 1,2 p_{max}$ - розрахунковий тиск, Па;

δ_k - додаткова товщина стінки для компенсації корозії, мм.

$$\delta_\phi > \delta + \delta_k$$

8. Закон Архімеда і його практичне використання в гідравліці

Закон Архімеда сформулюється у вигляді наступного твердження: на тіло, занурене в рідину, діє виштовхуюча сила, рівна вазі рідини, що було витісненою цим тілом:

$$P = \rho g V,$$

де V – об'єм тіла зануреного у рідину, м³.

З закону Архімеда випливає, що на будь-яке тіло повністю або частково занурене у рідину діє дів сили (рис. 2.26).

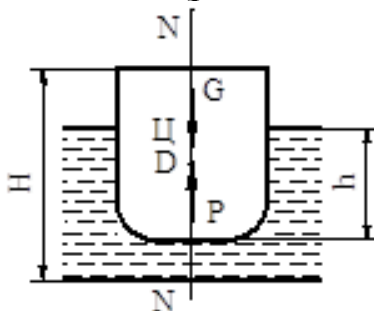


Рисунок 2.26 – Занурене тіло

Вага тіла:

$$G = \rho_T g V_T,$$

Архімедова сила (виштовхуюча):

$$P = \rho_{\text{ж}} g V_0,$$

де ρ_T – густина плаваючого тіла, кг/м^3 ;

V_T – об'єм плаваючого тіла, м^3 ;

$\rho_{\text{ж}}$ – густина рідини, кг/м^3 ;

V_0 – об'єм частково зануреного в рідину тіла (об'ємна водотоннажність).

точка Ц – центр мас

точка D – центр об'ємної водотоннажності (центр тиску)

вісь NN – вісь плавання (див. Рис. Внизу))

Сила тяжіння G прикладена в центрі тяжіння тіла точка Ц, направлена вниз і завжди лежить на осі плавання NN (рис. 10а). Архімедова сила прикладена в центрі об'ємної водотоннажності точка D, направлена вгору і при нахиленні тіла зміщується з осі NN. В однорідному тілі, повністю зануреному у рідину, точці Ц і D, співпадають. Висновок – ці точки міняють взаємне розміщення при різній глибині занурення)

Розрізняють три випадки плавання тіл:

1. $G > P$ або $\rho_T > \rho_{\text{ж}}$ – тіло тоне;

2. $G = P$ или $\rho_T = \rho_{\text{ж}}$ – тіло знаходиться у підвішеному стані, тобто буде занурено на будь-яку глибину, воно не буде ані вспливати, ни тонути;

3. $G < P$ або $\rho_T < \rho_{\text{ж}}$ – тіло спливає на поверхню рідини до тих пір поки виштовхуюча сила стане рівною силі ваги, тобто поки не буде $G = P$.

Для тіла, плаваючого на поверхні рідини умова рівноваги:

$$\rho_T g V_T = \rho_{\text{ж}} g V_0.$$

Звідки

$$\frac{V_0}{V_T} = \frac{\rho_T}{\rho_{\text{ж}}}.$$

Для призматичних тіл:

$$\frac{h}{H} = \frac{\rho_T}{\rho_{\text{ж}}},$$

де h – глибина занурення (осадка) тіла, м;

H – повна висота плаваючого тіла, м.

9. Поняття про плавучість і остійність тіл в рідині.

Тіло, частково занурене у рідину володіє остійністю. **Остійність** це здатність плаваючого тіла, виведеного з стану рівноваги, знову повертається у цей стан. При вертикальному положенні плаваючого тіла центр тяжіння точка Ц і центр об'ємної водотоннажності точка D лежать на осі плавання NN (рис. 10, а). При нахилі тіла центр об'ємної водотоннажності зміщується з осі плавання (рис. 2.27, в).

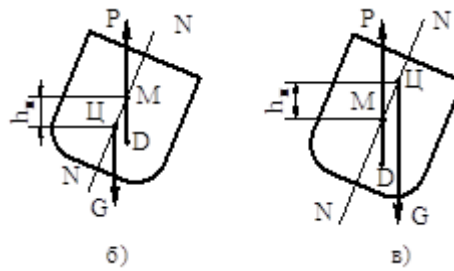


Рисунок 2.27 – Схема до пояснення остійності

Точка перетину Архімедової сили P з віссю плавання NN називається **метацентром** (точка M). Відстань h_m між метацентром та центром тяжіння називається **метацентричною висотою**. На (рис. 10, б) центр водотоннажності (точка D) при крене опинився правіше точки центра тяжіння тіла Π в результаті чого виник момент, який повертає тіло у положення спокою. Даний випадок характеризується тим, що метацентр M лежить вище точки Π .

На (рис. 2.27, в) центр водотоннажності D при крені опинився лівіше точки Π , виник момент, який перекидає судно. Даний момент характеризується тим, що метацентр M лежить нижче точки Π . Таким чином, якщо метацентрична висота більше нуля $h_m > 0$ тіло є остійним, якщо $h_m < 0$ неостійним.

Точка M – метацентр

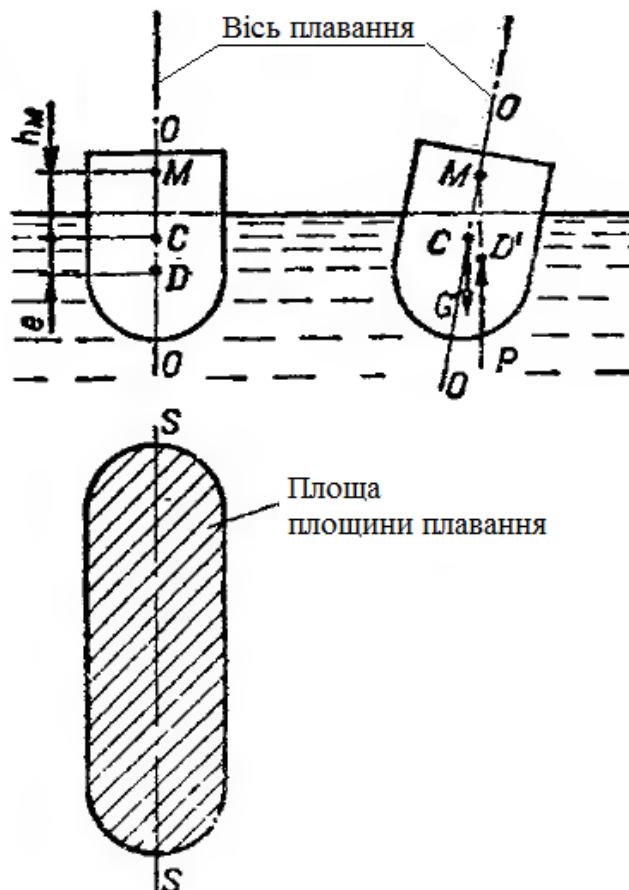


Рисунок 2.28 – Параметри до визначення остійності

Площа плавання – переріз по площині плавання – площина рідини.

$$h_m = \frac{I_0}{W} - e,$$

де I_0 - момент інерції площі площині плавання щодо поздовжньої осі S-S;

W - водотоннажність тіла;

e - відстань між центром ваги і центром водотоннажності.

Якщо метацентр лежить нижче центра ваги тіла, тобто метацентрична висота негативна, то тіло є нестійним.

10. Відносна рівновага рідини в судинах рухомих прямолінійно і рівноприскорено

Раніше було розглянуто в основному рівновагу рідини під дією лише однієї масової сили - її ваги. Цей випадок, має місце тоді, коли рідина перебуває у стані спокою у посудині, нерухомій відносно Землі, а також у посудині, яка рухається рівномірно та прямолінійно. Якщо ж посудина з рідиною знаходиться в нерівномірному або не прямолінійно русі, то на частки рідини крім сили тяжіння діють ще сили інерції, причому якщо вони постійні за часом, то рідина приймає нове положення рівноваги. Така рівновага рідини називається відносним спокоєм.

При відносному спокої вільна поверхня рідини та інші поверхні рівня можуть істотно відрізнятися від поверхонь рівня при спокої рідини в нерухомому посудині, тобто від горизонтальної площини. При визначенні форми і положення вільної поверхні рідини, що знаходиться у відносному спокої, слід керуватися основною властивістю будь-якої поверхні рівня, яка полягає в наступному: рівнодіюча масових сил завжди діє нормально до поверхні рівня. Справді, якби рівнодіюча масова сила діяла під деяким кутом до поверхні рівня, то дотична складова цієї сили викликала б переміщення частинок рідини уздовж поверхні рівня. Однак в стані відносного спокою відсутні будь-які переміщення частинок рідини як щодо стінок посудини, так і відносно один одного. Отже, єдино можливим напрямком рівнодіючої масової сили є напрямок, нормальний до вільної поверхні, а також і до інших поверхонь рівня.

Поверхні рівня не можуть між собою перетинатися, інакше по лінії перетину двох таких поверхонь був би отриманий ряд точок, тиск в яких в один і той же час мав би два різних значення, що неможливо.

Розглянемо два характерних випадки відносного спокою рідини: в посудині, що рухається прямолінійно і рівноприскорено і в посудині, що обертається навколо вертикальної осі з постійною кутовою швидкістю.

Нехай посудина з рідиною рухається прямолінійно з постійним прискоренням a . В цьому випадку результуюча масова сила, що діє на рідину, знайдемо як суму векторів сили інерції, спрямованої в бік, зворотний прискоренню a й сили тяжіння (рис. 2.29).

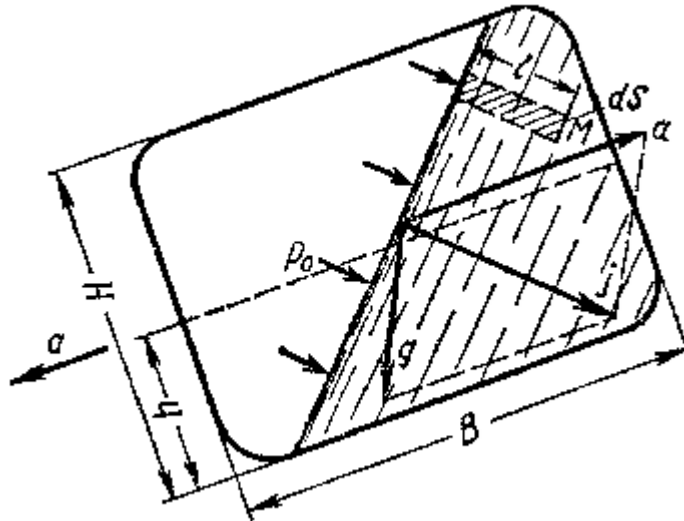


Рисунок 2.29 – Сили, що діють при відносному спокої рідини і прямолінійному рівноприскореному русі посудини

Позначивши вектор рівнодійної масової сили, віднесеної до одиниці маси, через \bar{j} , отримаємо

$$\bar{j} = \bar{a} + \bar{g},$$

де \bar{a} і \bar{g} – вектори одиничних сил інерції і тяжіння,

Для всіх частинок розглянутого об'єму рідини рівнодіючої масові сили паралельні один одному, а поверхні рівня перпендикулярні до цих сил, тому всі поверхні рівня, в тому числі вільна поверхня, є площинами, паралельними один одному. Кут нахилу цих площин до горизонту визначається з умови перпендикулярності їх до сили \bar{j} .

Для визначення положення вільної поверхні рідини в посудині, що рухається прямолінійно рівноприскорено, необхідно до попереднього умові додати рівняння обсягів, тобто треба знати об'єм рідини в посудині і висловити його через розміри посудини B і H і початковий рівень рідини h .

Рівняння, що дозволяє знаходити тиск в будь-якій точці розглянутого об'єму рідини, можна отримати наступним шляхом. Візьмемо, наприклад, близько точки M майданчик dS , паралельний вільній поверхні, і на цьому майданчику побудуємо циліндричний об'єм з утворюючою (*рос. образующей*), нормальної до вільної поверхні. Умова рівноваги зазначеного обсягу рідини в напрямку, нормалі до вільної поверхні матиме вигляд

$$p dS = p_0 dS + j \rho l dS,$$

де останній член являє собою повну масову силу, діючу на виділений об'єм рідини, а l – відстань від точки M до вільної поверхні.

Після скорочень на dS отримаємо

$$p = p_0 + j \rho l.$$

В окремому випадку, при $a = 0$ і відповідно $j = g$ ця формула перетворюється в основне рівняння гідростатики

$$p = p_0 + h\rho g = p_0 + h\gamma.$$

10. Відносна рівновага рідини в посудині при її рівномірному обертальному русі

Візьмемо відкритий циліндричний посудину з рідиною і надамо йому обертання з постійною кутовою швидкістю ω навколо його вертикальної осі.

Рідина поступово придбає ту ж кутову швидкість, що і посудина, а вільна поверхня її видозміниться; в центральній частині рівень рідини знизиться, під стінками - підвищиться, і вся вільна поверхня рідини стане деякою поверхнею обертання (рис. 2.30).

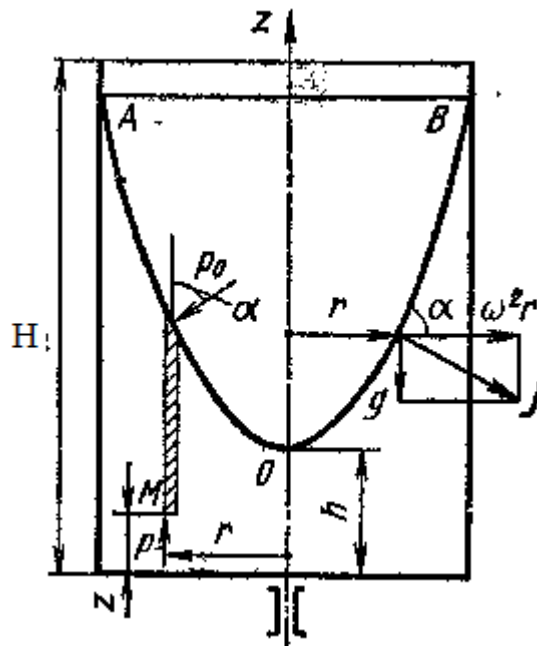


Рисунок 2.30 – Поверхня обертання

На рідину в цьому випадку будуть діяти дві масові сили - сила тяжіння і відцентрова сила, які, будучи віднесеними до одиниці маси, відповідно рівні g та $\omega^2 r$. Рівнодіюча масова сила j збільшується зі збільшенням радіуса за рахунок другої складової, а кут нахилу її до горизонту зменшується. Ця сила нормальна до вільної поверхні рідини, тому нахил цієї поверхні зі збільшенням радіуса зростає. Знайдемо рівняння кривої AOB в системі координат z і r з початком в центрі дна посудини. З огляду на, що сила j є нормаллю до кривої AOB, з креслення знаходимо

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha &= dz/dr = \omega^2 r/g, \\ \text{Звідкіля } dz &= \omega^2 r dr/g, \\ \text{або після інтегрування} \\ z &= \omega^2 r^2/(2g) + C. \end{aligned}$$

У точці перетину кривої АОВ з віссю обертання $r = 0, z = h = C$,
тому остаточно будемо мати

$$z = h + \omega^2 r^2/(2g), \quad (1.34)$$

Тобто, крива АОВ є параболою, а вільна поверхня рідини - параболоїдом.

Таку ж форму мають н інші поверхні рівня. Користуючись рівнянням (1.34), можна визначити положення вільної поверхні в посудині, наприклад максимальну висоту Н підйому рідини і висоту h розташування вершини параболоїда при даній кутовій швидкості ω .

Для цього необхідно використовувати ще рівняння об'ємів: об'єм нерухомої рідини дорівнює її обсягу під час обертання.

Для визначення закону зміни тиску під обертається рідини в функції радіуса і висоти виділимо вертикальний циліндричний об'єм рідини з основою у вигляді елементарної горизонтальної майданчику dS (точка М) на довільному радіусі r і висоті z і запишемо умову його рівноваги у вертикальному напрямку. З урахуванням рівняння (1.34) будемо мати

$$\begin{aligned} p dS - [h - z + \omega^2 r^2/(2g)] \rho g dS - \\ - p_0 (dS/\cos \alpha) \cos \alpha = 0. \end{aligned}$$

Після скорочення получим

$$p = p_0 + [h - z + \omega^2 r^2/(2g)] \rho g. \quad (1.35)$$

Це означає, що тиск зростає пропорційно радіусу r зменшується пропорційно висоті z .

Якщо посудина, що обертається навколо вертикальної осі, має кришку і заповнений рідиною доверху, то її форма змінитися не може, але змінюється тиск у відповідності з виразом (1.35). На рис. 2.31 показана епюра тиску по кришці, стінці і дну судини.

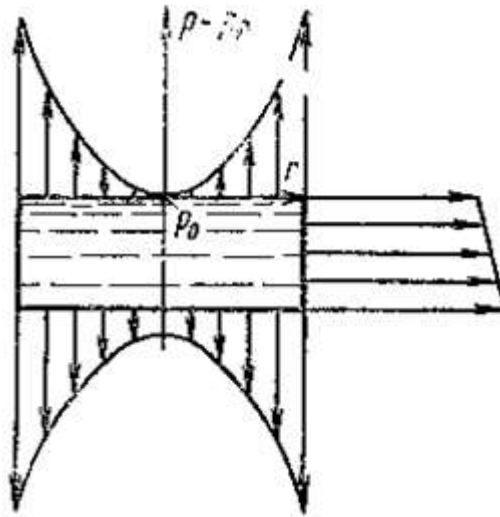


Рисунок 2.31 – Епюри тисків на кришку, стінку і днище сосуда, що крутиться

На практиці часто розглядається обертання посудини з рідиною, коли кутова швидкість ω настільки велика, що силою тяжіння можна знехтувати в порівнянні з відцентровими силами. При цьому закон зміни тиску в рідині легко отримати з формули (1.35), в якій слід прийняти $z = h = 0$. Кут, утворений віссю обертання посудини з вертикаллю, значення не має, а поверхні рівня можна вважати круглими циліндрами із загальною віссю - віссю обертання посудини. Якщо до того ж тиск p_0 діє не в центрі, а при $r = r_0$, то очевидно, що замість виразу (1.35) будемо мати

$$p = p_0 + \rho \omega^2 (r^2 - r_0^2)/2.$$

Часто буває необхідно визначити силу тиску обертається разом з посудиною рідини на його стінку, нормальну до осі обертання (або на кільцеву частина цієї стінки). Для цього необхідно висловити спочатку силу тиску, що припадає на елементарну кільцеву площадку радіусом r і шириною dr :

$$dF = p dS = [p_0 + \rho \omega^2 (r^2 - r_0^2)/2] 2\pi r dr,$$

а потім виконати інтегрування і необхідних межах.

При великий кутовий швидкості рідини можна отримати досить значну сумарну силу тиску на стінку. Це використовується в деяких фрикційних муфтах, де для здійснення зчеплення двох валів потрібне створення великих сил нормального тиску. Спосіб, зазначений вище, застосовують для визначення сили осьового тиску рідини на робочі колеса відцентрових насосів, а також па кришки центрифуг.