

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

для проведення практичних занять, виконання розрахунково-графічного
завдання та самостійної роботи
з навчальної дисципліни

«ТЕХНІЧНА МЕХАНІКА РІДИНИ ТА ГАЗУ»

*(для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочної
форм навчання зі спеціальностей 192 – Будівництво та цивільна інженерія,
194 – Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології)*

Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2024

Методичні рекомендації для проведення практичних занять, виконання розрахунково-графічного завдання та самостійної роботи з навчальної дисципліни «Технічна механіка рідини та газу» (для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання зі спеціальностей 192 – Будівництво та цивільна інженерія, 194 – Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. Т. О. Шевченко. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2024. – 69 с.

Укладач канд. техн. наук, доц. Т. О. Шевченко

Рецензент

М. В. Дегтяр, кандидат технічних наук, доцент кафедри водопостачання, водовідведення і очищення вод Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

Рекомендовано кафедрою водопостачання, водовідведення і очищення вод, протокол № 1 від 29.08.2023

ЗМІСТ

1 Практичні заняття.....	4
1.1 Фізичні властивості рідин і газів.....	4
1.1.1 Питома маса і питома вага.....	4
1.1.2 Стисливість, температурне розширення і пружність рідин та газів.....	5
1.1.3 В'язкість.....	6
1.2 Основне рівняння рівноваги рідини під дією сил ваги.....	8
1.2.1 Геометричне і фізичне тлумачення основного рівняння гідростатики.....	9
1.3 Визначення сили тиску на плоскі стінки і дно посудини.....	10
1.4 Визначення сили тиску на криволінійні поверхні.....	13
1.5 Закон Архімеда та елементи теорії плавучості.....	15
1.6 Види руху рідини.....	20
1.7 Лінії та трубки течії.....	21
1.8 Гідравлічні характеристики потоку рідини.....	21
1.9 Рівняння Д. Бернуллі.....	22
1.10 Режими руху рідини.....	23
1.11 Втрати напору за довжиною.....	25
1.12 Місцеві втрати напору у трубах.....	31
2 Розрахунково-графічне завдання.....	42
3 Самостійне вивчення дисципліни.....	53
Список використаних джерел.....	60
Додаток А.....	61
Додаток Б.....	61
Додаток В.....	62
Додаток Г.....	63
Додаток Д.....	63
Додаток Е.....	64
Додаток Ж.....	64
Додаток И.....	64
Додаток К.....	64
Додаток Л.....	65
Додаток М.....	65
Додаток Н.....	66
Додаток П.....	67
Додаток Р.....	67
Додаток С.....	68
Додаток Т.....	68

1 ПРАКТИЧНІ ЗАНЯТТЯ

1.1 Фізичні властивості рідин і газів

Технічна механіка рідини та газу або гідравліка – це наука, яка вивчає закони рівноваги та руху рідини, розробляє методи пристосування їх для практичних розрахунків.

Рідиною називають тіло з надзвичайно великою рухливістю часток одна відносно одної, яке не може перебувати в стані рівноваги при дії на нього дотичних напружень.

Фізичні властивості рідини газів виявляються в особливостях їх поведінки в тих чи інших умовах. Вони є базовими для багатьох законів і формул гідравліки.

1.1.1 Питома маса і питома вага

Нехай рідина масою M займає об'єм W . Тоді відношення

$$\rho = \frac{M}{W}, \text{ кг/м}^3 \quad (1.1)$$

є величиною, що характеризує речовину рідини, яку будемо називати питомою масою рідини. Одиниця питомої маси – кілограм на кубічний метр (кг/м^3). Наприклад, питома маса прісної води при 4°C становить $\rho = 1\,000 \text{ кг/м}^3$.

Якщо однорідна рідина займає об'єм W , а вага рідини в цьому об'ємі G , то під питомою вагою рідини розуміють відношення

$$\gamma = \frac{G}{W}, \text{ Н/м}^3. \quad (1.2)$$

Одиниця питомої ваги – ньютон на кубічний метр (Н/м^3). Наприклад, питома вага прісної води при 4°C становить $\gamma = 9\,810 \text{ Н/м}^3$.

Питома маса рідини залежить від температури. Для температури t питому масу можна визначити за формулою

$$\rho_t = \frac{\rho_0}{1 + \beta_t \cdot t}, \text{ кг/м}^3, \quad (1.3)$$

де ρ_0 – питома маса рідини при 0°C ;

β_t – коефіцієнт температурного розширення рідини.

Питома маса досконалих (ідеальних) газів визначається характеристичним рівнянням Клапейрона – Менделєєва:

$$\rho = \frac{p}{R \cdot T}, \text{ кг/м}^3, \quad (1.4)$$

де R – питома газова стала, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$;

p – абсолютний тиск, Па ;

T – абсолютна температура, К .

Питома маса газу, як це зрозуміло з рівняння (1.4), істотно зменшується зі зростанням температури і зменшується пропорційно до зростання тиску при незмінній температурі.

Питома маса повітря при стандартних умовах ($t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$); $p = 101\,325 \text{ Па}$ і $R = 287 \text{ Дж/кг К}$) дорівнює $1,2 \text{ кг/м}^3$.

На основі другого закону Ньютона між питомою масою і питомою вагою існує зв'язок:

$$\gamma = \rho \cdot g, \text{ Н/м}^3 \quad . \quad (1.5)$$

Залежність питомої маси (щільності) від температури наведено у додатку А.

Приклад. 5 л нафти важать 41,7 Н. Треба визначити питому масу і питому вагу.

Розв'язання. Переводимо об'єм у літрах у кубічні метри:

$$W = 5 \text{ л} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

Питома вага за формулою (1.2) становитиме:

$$\gamma = \frac{41,7}{5 \cdot 10^{-3}} = 8340 \text{ Н/м}^3.$$

Питому масу знайдемо за формулою (1.5):

$$\rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{8340}{9,81} = 850,15 \text{ кг/м}^3.$$

1.1.2 Стиснутість, температурне розширення і пружність рідин та газів

Стиснутість – це здатність рідин змінювати свій об'єм при зміні тиску. Мірою стисливості рідин слугує коефіцієнт об'ємного стиснення β_p , що становить відносне зменшення об'єму W при підвищенні на одиницю тиску p :

$$\beta_p = -\frac{dW}{W \cdot dp}, \text{ Па}^{-1} \quad . \quad (1.6)$$

Знак мінус у формулі (1.6) означає, що при збільшенні тиску об'єм зменшується. Якщо вважати, що одиницею тиску є (Па), то коефіцієнт об'ємного стиснення буде вимірюватися у (Па^{-1}) або у квадратних метрах на ньютон ($\text{м}^2/\text{Н}$).

Коефіцієнт об'ємного стиску можна виразити і через відносне збільшення питомої маси:

$$\beta_p = -\frac{d\rho}{\rho \cdot dp}, \text{ Па}^{-1} \quad . \quad (1.7)$$

Величина, зворотна коефіцієнту об'ємного стиснення, становить об'ємний модуль пружності рідини E , Па:

$$E = \frac{1}{\beta_p}, \text{ Па.} \quad (1.8)$$

За нормальних умов приймають:

$$\beta_p = \frac{1}{2 \cdot 10^9} \text{ Па}^{-1}, \text{ тоді } E = 2 \cdot 10^9 \text{ Па.}$$

Коефіцієнт температурного розширення β_t становить відносну зміну об'єму при зміні температури на один градус:

$$\beta_t = \frac{dW}{W \cdot dt}, \text{ Па}^{-1} \quad (1.9)$$

де dW – зміна об'єму, яка відповідає зміні температури dt .
Значення коефіцієнтів β_p ; β_t ; E подані в додатку В.

Приклад. Визначити підвищення тиску, при якому початковий об'єм води зменшиться на 1,5 %.

Розв'язання. З формули (1.6) знайдемо:

$$dp = \frac{dW}{W} \cdot \frac{1}{\beta_p},$$

де $\Delta W/W$ за умовою задачі становить 0,015.

Коефіцієнт стиснутості для води за додатком В $\beta_p = 5,2 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$ (середнє значення, бо температура води не задана):

$$dp = \frac{0,015}{5,2 \cdot 10^{-10}} = 28,85 \cdot 10^6 \text{ Па} = 28,85 \text{ МПа}.$$

1.1.3 В'язкість

В'язкість рідини – це результат взаємодії внутрішньомолекулярних силових полів, які перешкоджають відносному рухові між двома шарами рідини.

Отже, для переміщення частинок одна відносно одної необхідно подолати їх взаємне притягіння, до того ж чим воно більше, тим більша потрібна сила зсуву.

В'язкість є однією з важливих причин втрати енергії в потоці рідини.

Закон в'язкого тертя Ньютона математично записується виразом

$$\tau = \mu \cdot \frac{dU}{dh}, \quad (1.10)$$

де τ – напруження зсуву, що виникають між двома паралельними шарами рідини;

$\frac{dU}{dh}$ – градієнт швидкості, тобто зміна швидкості на одиницю довжини;

μ – коефіцієнт пропорційності, який є фізичним параметром і називається *динамічною в'язкістю*:

$$\mu = \frac{\tau}{\frac{dU}{dh}}. \quad (1.11)$$

Динамічна в'язкість дистильованої води при 4 °С становить $10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$, або 1 мПа·с.

У деяких задачах у гідравліці зазвичай використовують відношення динамічної в'язкості μ до питомої маси рідини або газу ρ , яке позначають літерою ν , тобто

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}. \quad (1.12)$$

Це відношення називають *кінематичною в'язкістю*. Кінематична в'язкість води при 4 °С становить 10^{-6} м²/с; для повітря при нормальних атмосферних умовах $\nu = 14,4 \cdot 10^{-6}$ м²/с, або Стоксах $1 \text{ ст} = 1 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

Відомості про динамічну та кінематичну в'язкості наведені в додатку Г.

Контрольні запитання

1. Що таке питома маса і питома вага? Який між ними зв'язок ?
2. Що таке стиснутість, пружність? Якими параметрами вони характеризуються?
3. Як записується закон Ньютона для внутрішнього тертя в рідині ?
4. Що таке динамічна і кінематична в'язкість? Як вони зв'язані?

Приклади розв'язання задач

Задача 1. Визначити, який об'єм води необхідно додатково подати до водоводу діаметром $d = 500$ мм та довжиною $l = 1$ км для підвищення тиску до $\Delta p = 5 \cdot 10^6$ Па. Водовід підготовлений до гідравлічних випробувань і залитий водою при атмосферному тиску. Деформацією труб можна знехтувати.

Розв'язання. Ємність водоводу

$$W_{TP} = \frac{\pi d^2}{4} \cdot l = \frac{3,14 \cdot 0,5^2}{4} \cdot 1000 = 196,2 \text{ м}^3.$$

Об'єм води ΔW , який треба подати до водоводу для підвищення тиску, знайдемо зі співвідношення (1.6):

$$\beta_p = \frac{dW}{W \cdot dp} = \frac{dW}{(W_{TP} + dW) \cdot dp}.$$

З додатка В беремо значення $\beta_p = 5,2 \cdot 10^{-10}$ Па⁻¹ = $0,5 \cdot 10^9$ Па⁻¹.

Тоді

$$dW = \frac{W_{TP} \cdot \beta_p \cdot dp}{1 - \beta_p \cdot dp} = \frac{196,2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-9} \cdot 5 \cdot 10^6}{1 - 0,5 \cdot 10^{-9} \cdot 5 \cdot 10^6} = 0,493 \text{ м}^3.$$

Задача 2. Визначити середню товщину сольових відкладень $S_{\text{від}}$ у водоводі з внутрішнім діаметром $d_{mp} = 0,3$ м та довжиною $l = 2$ км. При витіканні води в кількості $\Delta W = 0,05$ м³ тиск у водоводі зменшився на $\Delta p = 1 \cdot 10^6$ Па.

Розв'язання. Приймаємо значення $\beta_p = 5,2 \cdot 10^{-10}$ Па⁻¹ = $0,5 \cdot 10^9$ Па⁻¹. Тоді ємність водоводу з виразу (1.6)

$$W = \frac{0,05}{0,5 \cdot 10^{-9} \cdot 1 \cdot 10^6} = 100 \text{ м}^3.$$

Середній внутрішній діаметр водоводу

$$d = \sqrt{\frac{4W}{\pi l}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 100}{3,14 \cdot 2000}} = 0,252 \text{ м}.$$

Середня товщина шару:

$$S = \frac{d_{mp} - d}{2} = \frac{0,3 - 0,252}{2} = 0,024 \text{ м} = 24 \text{ мм.}$$

Задача 3. Система опалення (котел, радіатори та трубопроводи) невеликого будинку вміщає $W = 0,4^3$ м води. Скільки води додатково зайде до розширювального бака при нагріванні від 20 до 90 °С?

Розв'язання. Питома маса води при температурі 20 °С $\rho_{20^\circ} = 998,23 \text{ кг/м}^3$.

Маса води

$$M = W \cdot \rho_{20^\circ} = 0,4 \cdot 998,23 = 399 \text{ кг.}$$

Питома маса води при температурі 90 °С $\rho_{90^\circ} = 965,34 \text{ кг/м}^3$.

Об'єм, який займає вода,

$$W = \frac{M}{\rho_{90^\circ}} = \frac{399}{965,34} = 0,414 \text{ м}^3.$$

Додатковий об'єм –

$$\Delta W = 0,414 - 0,4 = 0,014 \text{ м}^3.$$

1.2 Основне рівняння рівноваги рідини під дією сил ваги

Тиск на поверхні рідини позначено через p_0 . При дії на рідину тільки сил ваги (стан абсолютного спокою) будемо мати:

$$dp = -\rho g dz. \quad (1.13)$$

У результаті інтегрування цього рівняння для рідини, що не стискається, одержимо:

$$z + \frac{p}{\rho g} = C. \quad (1.14)$$

Для знаходження константи інтегрування C візьмемо на поверхні рідини, для якої $z = z_0$, а $p = p_0$. Тоді вираз (1.14) можна подати так:

$$z + \frac{p}{\rho g} = z_0 + \frac{p_0}{\rho g}. \quad (1.15)$$

Рівняння (1.14) називають основним рівнянням гідростатики. Вираз (1.15) можна переписати у вигляді

$$p = p_0 + \rho g (z_0 - z),$$

або, взявши до уваги, що $z_0 - z = h$,

$$p = p_0 + \rho g h \quad (1.16)$$

Формула (1.16) дає змогу визначити гідростатичний тиск у будь-якій точці рідини, що перебуває в стані спокою, а саме абсолютний тиск в точці дорівнює сумі зовнішнього поверхневого і вагового тиску (величина $\rho g h = \gamma h$ називається ваговим тиском).

З рівняння (1.16) випливає закон Паскаля: *всяка зміна тиску в будь-якій точці рідини, що перебуває в стані спокою, яка не порушує її рівноваги, в усі інші точки передається однаково.*

У відкритій посудині на поверхні рідини діє атмосферний тиск, тобто $p_0 = p_{атм}$:

$$p = p_{атм} + \rho g h. \quad (1.17)$$

Перевищення абсолютного тиску над атмосферним називають *надлишковим тиском*, тобто $p_{над} = p_{абс} - p_{атм}$, або *манометричним тиском*.

Різницю між атмосферним і абсолютним тиском називають *вакуумом*, тобто

$$p_{вак} = p_{атм} - p_{абс}. \quad (1.18)$$

1.2.1 Геометричне і фізичне тлумачення основного рівняння гідростатики

Для виконання геометричного і фізичного тлумачення основного рівняння гідростатики розглянемо рисунок 1.1.

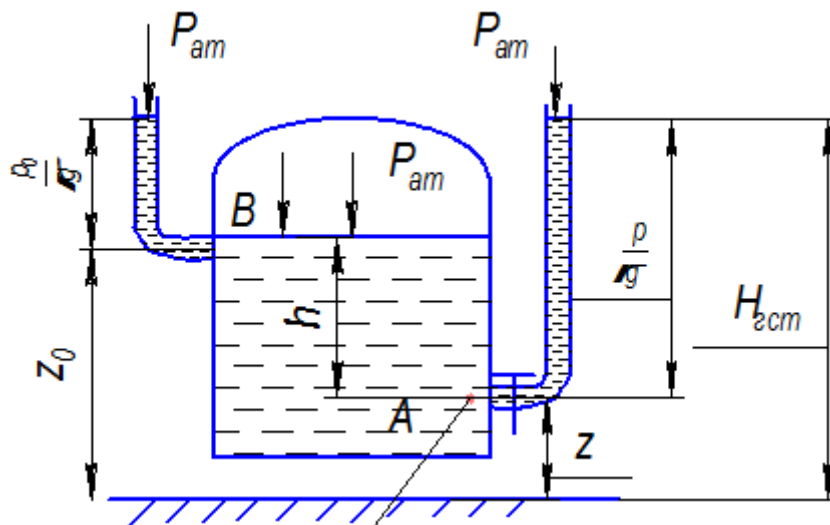


Рисунок 1.1 – Схема для геометричного та фізичного тлумачення основного рівняння гідростатики

Координата z у рівнянні (1.14) з геометричної точки зору характеризує положення довільної точки відносно прийнятої горизонтальної площини порівняння, тобто тієї площини, від якої ведеться відлік координат. Величину z називають *геометричною висотою*, або *висотою положення*.

Щодо величини $p/\rho g$, то легко переконатися, що вона також має розмірність довжини і називається *п'езометричною висотою*, яка відповідає *абсолютному тиску* в точці, якщо p – абсолютний тиск.

Якщо при обчисленні $p/\rho g$ в точці визначають надлишковий тиск, то величину $p/\rho g$ називають *п'езометричною висотою*, яка відповідає *надлишковому тиску* в точці, або просто *п'езометричною висотою*.

Таким чином, з геометричної точки зору сума двох величин в основному рівнянні гідростатики $z + p/\rho g = const$ є сумою двох висот: висоти положення і п'езометричної. Суму цих двох висот, яка відповідає абсолютному тиску, називають *повним* або *абсолютним гідростатичним напором*:

$$H_{пов} = z + \frac{p_{абс}}{\rho g}. \quad (1.19)$$

Якщо в розрахунках визначають не повний, а надлишковий тиск, то

$$H = z + \frac{P}{\rho g}. \quad (1.20)$$

Цю величину називають *п'єзометричним напором*.

Отже, з геометричної точки зору для всіх часток рідини, яка перебуває у стані спокою, *сума висоти положення і п'єзометричної висоти – величина стала і дорівнює гідростатичному напору*.

Рідина в стані спокою має певний запас потенційної енергії. Неважко довести, що з енергетичної точки зору величина $z + p/\rho g$ є мірою питомої потенційної енергії.

Величину $z + p/\rho g$ називають також *потенційним напором*.

Отже, з фізичної точки зору основне рівняння гідростатики можна тлумачити так: для всіх частинок однорідної рідини, яка перебуває в стані спокою, *питома потенційна енергія – величина постійна і дорівнює потенційному напору*.

Приклад 1. Визначити питому вагу морської води на глибині 300 м, де надлишковий тиск дорівнює 3,08 МПа.

Розв'язання. Оскільки на поверхні моря тиск атмосферний, то значення надлишкового тиску, відповідно до (1.16), становить $p = \rho gh$, звідки

$$\rho = \frac{p}{gh} = \frac{3,08 \cdot 10^6}{9,81 \cdot 300} = 1047 \text{ кг/м}^3.$$

Приклад 2. Знайти значення тиску p_o , прикладеного до поверхні рідини в закритому резервуарі (див. рис. 1.1), якщо вода в п'єзометрі піднялася на висоту $h_1 = 1,2$ м, а точка підімкнення п'єзометра А перебуває на глибині $h = 0,6$ м.

Розв'язання. Відповідно до основного закону гідростатики можна записати, що

$$p_o + \gamma h_1,$$

звідки

$$p_o = \rho g (h_1 + h) = 1000 \cdot 9,81 (1,2 - 0,6) = 5886 \text{ Па}.$$

1.3 Визначення сили тиску на плоскі стінки і дно посудини

У різних галузях інженерної практики потрібно знати силу, з якою рідина діє на тверді стінки, що її обмежують, а також точку прикладення рівнодійної сили або положення центру тиску.

Найлегше визначити силу тиску на горизонтальне дно посудини (рис. 1.2). Очевидно, що коли площа дна посудини ω , то силу тиску на горизонтальне дно обчислюють так:

$$P = p\omega = (p_{am} + \rho g H)\omega. \quad (1.21)$$

Без урахування тиску p_{am} , що діє на поверхню рідини, сила надлишкового тиску становить

$$P = \rho g \omega H. \quad (1.22)$$

З формул (1.21) і (1.22) випливає, що сила тиску рідини на плоске дно посудини довільної форми залежить тільки від величин ρ , g , ω , H і не залежить

від форми посудини. Це суперечить логіці і називається *гідростатичним парадоксом*.

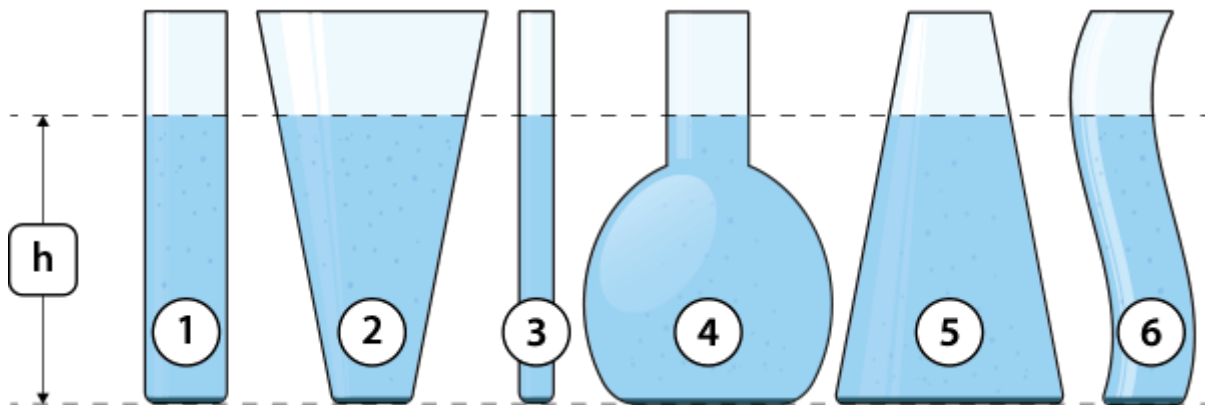


Рисунок 1.2 – Види посудин з рідиною для визначення сили тиску на дно посудини

З рисунка 1.2 зрозуміло, що всі посудини мають однакову висоту стовбців води, тому тиск на дно всіх посудин однаковий.

Визначимо силу тиску на плоску стінку. Розглянемо закритий резервуар (рис. 1.3), плоска стінка якого нахилена під кутом α до горизонту і перебуває, з одного боку, під дією тиску рідини і зовнішнього тиску P_o , а з другого – атмосферного тиску P_{am} .

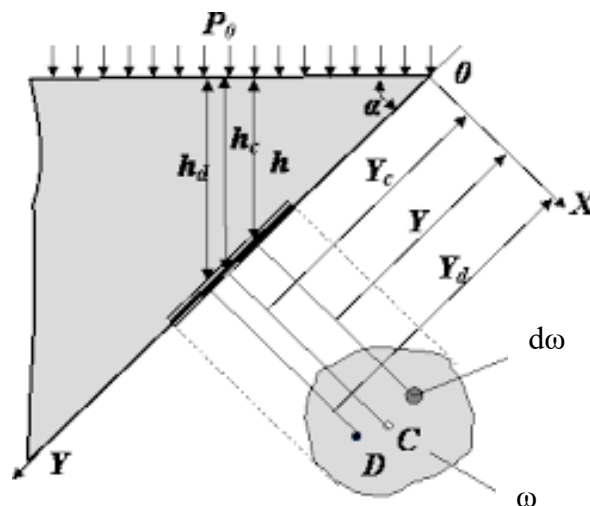


Рисунок 1.3 – Схема для визначення сили тиску рідини на плоску стінку посудини

Розіб'ємо всю площу змоченої частини стінки ω на безмежно малі площини $d\omega$.

Сила тиску на кожен площину

$$dP = [(P_o + \rho gh) - P_{am}]d\omega = \rho g z d\omega, \quad (1.23)$$

де

$$z = h_{\Pi} + h;$$

h – глибина занурення центра ваги площинки під рівень.

З рисунка 1.3 зрозуміло, що $z = y \sin \alpha$, отже

$$dP = \rho g y \sin \alpha d\omega. \quad (1.24)$$

Сила тиску на плоску стінку

$$P = \int dP = \rho g \cdot \sin \alpha \int_{\omega} y d\omega, \quad (1.25)$$

$$\int_{\omega} y d\omega = y_c \cdot \omega,$$

де y_c – відстань центра ваги площі ω від осі Ox .

Таким чином,

$$P = \rho g y_c \sin \alpha \omega, \quad (1.26)$$

або

$$P = \rho g z_c \omega = \rho g (h_{\Pi} + h_e) \omega = (\Delta p + \rho g h_e) \omega, \quad (1.27)$$

де

$$\Delta p = p_o - p_{am}.$$

Отже, сила тиску на плоску стінку визначається як добуток площі стінки на гідростатичний тиск у центрі ваги стінки.

У випадку відкритого резервуара $P_o = P_{am}$

$$P = \rho g h_c \omega. \quad (1.28)$$

Точку прикладення рівнодійної сил тиску рідини, тобто положення центра тиску, знайдемо, використавши теорему про момент рівнодійної сили: *момент рівнодійної сили відносно довільної осі дорівнює сумі моментів складових сил відносно цієї ж осі.*

Отже,

$$P_{y_D} = \int y dP. \quad (1.29)$$

Підставивши вирази для dP і P з формул (1.24) та (1.26), після скорочення на $\rho g \sin \alpha$ запишемо:

$$y_D = \frac{\int y^2 d\omega}{y_c \cdot \omega}. \quad (1.30)$$

Чисельник виразу (1.30) становить момент інерції I_x :

$$y_D = \frac{I_0}{y_c \cdot \omega}, \quad (1.31)$$

$$y_D = y_c + \frac{I_0 \sin^2 \alpha}{y_c \cdot \omega}, \quad (1.32)$$

де I_0 – момент інерції площі змоченої поверхні відносно горизонтальної осі, яка проходить через центр ваги;

y_c – центр ваги площі змоченої поверхні плоскої фігури.

$$h_c = y_c + \frac{I_0}{y_c \cdot \omega}. \quad (1.33)$$

Приклад 1. Визначити силу тиску води на пласку вертикальну стінку і знайти положення центра тиску. Стінка прямокутна з шириною $b = 5$ м і висотою 8 м. Прийняти, що верх стінки збігається з вільною поверхнею.

Розв'язання. За формулою (1.28) маємо:

$$P = \rho \cdot g \cdot \frac{H^2}{2} \cdot b = 1000 \cdot 9,81 \cdot \frac{8^2}{2} \cdot 5 = 1569600 \text{ Н} = 1,57 \text{ МН}.$$

Для знаходження центра тиску використаємо формулу (1.33), зваживши, що $y_d = h_d$, $y_c = h_c$, а момент інерції $I_0 = bH^3/12$.

Тоді

$$h_d = \frac{H}{2} + \frac{bH^3}{12 \cdot \frac{H}{2} \cdot b \cdot H} = \frac{H}{2} + \frac{H}{6} = \frac{2}{3}H = \frac{2}{3} \cdot 8 = 5,33 \text{ м}.$$

1.4 Визначення сили тиску на криволінійні поверхні

Знаходження сил тиску на криволінійній поверхні ускладнюється тим, що в загальному випадку сили тиску, які діють на елементи криволінійної поверхні, не є паралельними між собою.

Щоб визначити сили тиску на криволінійну поверхню, які складаються з горизонтальної та вертикальної складових (рис. 1.4), візьмемо циліндричну поверхню АВ з утворюючою, яка перпендикулярна до площини креслення (рис. 1.4), та визначимо силу тиску рідини на цю поверхню в двох випадках:

- 1) рідина розташована зверху (рис. 1.4, а);
- 2) рідина розташована знизу (рис. 1.4, б).

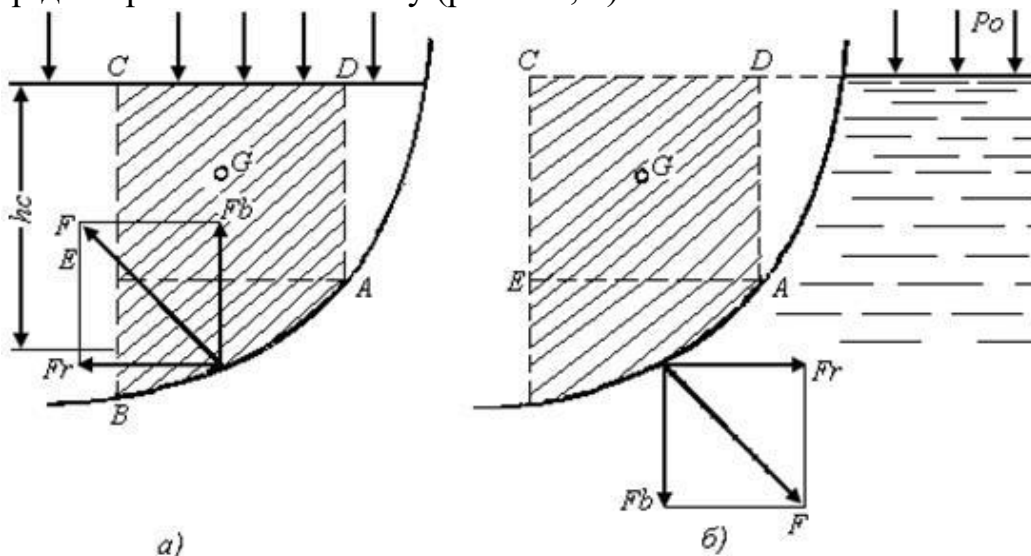


Рисунок 1.4 – Визначення сили тиску на криволінійні поверхні:
а – рідина розташована над криволінійною поверхнею; б – рідина розташована під криволінійною поверхнею

На виділений об'єм діють такі зовнішні сили:

1. Власна вага рідини G .

2. Горизонтальна складова сили тиску на вертикальну грань, що дорівнює P_x .

3. Реакція криволінійної поверхні R зі складовими R_x і R_z .

4. Вертикальна реакція S_z з боку дна ділянки.

Припустимо, що рідина затверділа, тоді сили, які діють на цей об'єм в проєкціях на весь Ox , будуть такими:

$$P_x - R_x = 0 \rightarrow P_x = R_x$$

На вісь Oz можна записати

$$G - R_z - S_z = 0 \rightarrow R_z = G - S_z = P_x$$

Оскільки S_z дорівнює вазі в об'ємі (рис. 1.4, а), то

$$G - S_z = P_z = \pm \rho g W, \quad (1.34)$$

де W – об'єм заштрихованого на рисунку 1.4 відсіку.

Цей об'єм прийнято називати об'ємом тіла тиску, і він є реальним (позитивним) при заповненні тіла тиску рідиною (рис. 1.4, а), у цьому випадку у формулі (1.34) береться знак плюс. Тіло тиску буде фіктивним (негативним), якщо воно не заповнене рідиною (рис. 1.4, б), тоді у формулі (1.34) буде знак мінус.

Горизонтальну компоненту тиску, за аналогією з формулою (1.27), запишемо так:

$$P_x = \rho g h_x \omega_x, \quad (1.35)$$

де h_x – глибина занурення центра ваги вертикальної проєкції криволінійної поверхні;

ω_x – площа вертикальної проєкції криволінійної поверхні (перпендикулярно до осі Ox).

Повна сила тиску на криволінійну поверхню

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_z^2}. \quad (1.36)$$

Напрямок сили дії P визначається кутом β :

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{P_z}{P_x}. \quad (1.37)$$

Якщо на поверхню рідини діє тиск P_o , відмінний від атмосферного, то

$$P_x = \rho g z_{cx} \omega_x = \rho g (h_n + h_{cx}) \omega = (\Delta p + \rho g h_{cx}) \omega_x, \quad (1.38)$$

а сила

$$P_z = (p_o - p_{am}) \omega_x + \rho g W = \rho g (h_n \omega_z + W) = \rho g (W_o - W), \quad (1.39)$$

де ω_z – площа горизонтальної проєкції криволінійної поверхні;

W_o – додатковий об'єм тіла тиску за рахунок дії тиску P_o .

Приклад 1. Круглий отвір у вертикальній стінці відкритого резервуару з водою перекрито сферичною кришкою (рис. 1.5) діаметром $d = 1$ м. Глибина занурення центра ваги кришки $h_e = 2$ м. Визначити силу тиску на кришку і напрям її дії відносно горизонту.

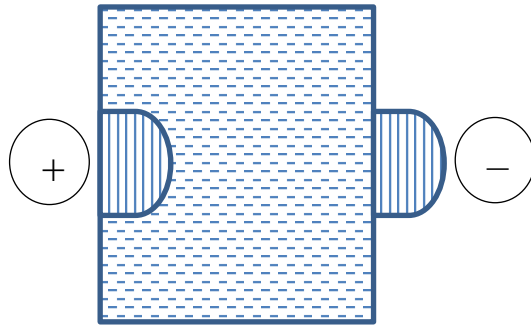


Рисунок 1.5 – Схема резервуару з отворами в стінках до прикладу 1

Розв'язання. Горизонтальну компоненту P_x знаходимо за формулою (1.35):

$$P_x = \rho g h_c \cdot \frac{\pi d^2}{4} = 1000 \cdot 9,81 \cdot 2 \cdot \frac{3,14 \cdot 1^2}{4} = 15401,7 \text{ Н} = 15,4 \text{ кН.}$$

Вертикальна компонента

$$P_z = \rho g W = \rho g \cdot \frac{\pi d^3}{12} = 1000 \cdot 9,81 \cdot \frac{3,14 \cdot 1^3}{12} = 2567 \text{ Н} = 2,57 \text{ кН.}$$

Повна сила тиску

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_z^2} = \sqrt{15,4^2 + 2,57^2} = 15,6 \text{ кН.}$$

1.5 Закон Архімеда та елементи теорії плавучості

Закон Архімеда можна сформулювати так: *на тіло, повністю або частково занурене в рідину, діє вертикальна і спрямована вгору виштовхувальна сила, яка дорівнює вазі витісненої рідини.* Цей тиск називають силою виштовхування, або підйомною силою:

$$P_{\text{виш}} = \rho \gamma W_{\text{зан}}, \quad (1.40)$$

де ρ – питома маса рідини.

Для тіла, яке плаває на поверхні рідини, справедливе співвідношення

$$\frac{W_{\text{зан}}}{W} = \frac{\rho_T}{\rho}, \quad (1.41)$$

де W – об'єм тіла, яке плаває,
 ρ_T – питома маса тіла.

Вагу рідини, витісненої тілом, називають *водотоннажністю*, а центр ваги маси рідини в об'ємі зануреної частини тіла – центром *водотоннажності*.

За наявності температурного поля питома маса рідини залежить від температури. З її підвищенням питома маса зменшується, а співвідношення питомих мас рідини в двох точках можна визначити так:

$$\frac{\rho_0}{\rho} = 1 + \beta_t \cdot \Delta t, \quad (1.42)$$

де ρ_0 – питома маса рідини при температурі $0 \text{ }^\circ\text{C}$;

β_t – коефіцієнт температурного розширення;

Δt – різниця температур.

Теорія плавання тіл заснована на законі Архімеда. Можуть існувати такі випадки:

$G > P_z$ (P_z – підйомна сила) – тіло тоне.

$G = P_z$ – тіло плаває в зануреному стані.

$G < P_z$ – тіло впливає на поверхню.

При плаванні неоднорідного тіла в зануреному стані можливі такі три випадки (рис. 1.6): стійка рівновага тіла (схема б); нестійка рівновага тіла (в); байдужа рівновага тіла (а).

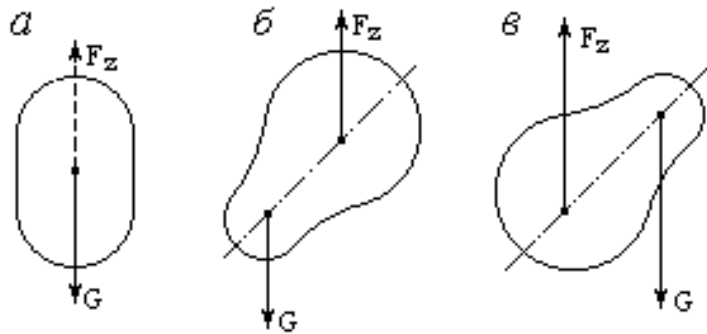


Рисунок 1.6 – Схема плавання тіла:

а – байдужа рівновага тіла; б – стійка рівновага; в – нестійка рівновага

Якщо центр ваги (рис. 1.6, б) нижче точки центра водотоннажності, то рівновага є стійкою. Коли центр ваги вище центра водотоннажності (рис. 1.6, в), то рівновага є нестійкою.

Остійністю судна називають його здатність повертатися в початковий стан рівноваги.

Приклад. Камінь масою 80 кг лежить на дні водойми; його об'єм $3,4 \cdot 10^4 \text{ см}^3$. Яка потрібна сила, щоб відірвати камінь від дна?

Розв'язання. Виштовхувальна сила, яка діє на камінь у воді, дорівнює вазі води об'ємом $3,4 \cdot 10^4 \text{ см}^3$.

$$P_z = \rho g W = 1000 \cdot 9,81 \cdot 3,4 \cdot 10^4 = 333,5 \text{ Н.}$$

Вага каменя

$$G = Mg = 80 \cdot 9,81 = 784,8 \text{ Н.}$$

Сила, потрібна для відриву каменя,

$$F = G - P_z = 784,8 - 333,5 = 451,3 \text{ Н.}$$

Задачі для розв'язання

Задача 1. Визначити питому вагу рідини, яка не змішується з водою і налита у ліве коліно U-подібної скляної трубки на висоту $h = 1,0 \text{ м}$, якщо у праве коліно трубки налита вода і її рівень розміщується нижче рівня рідини у лівому коліні на $\Delta h = 0,2 \text{ м}$. Питома вага води $\gamma_в = 1 \text{ г/см}^3$ (рис. 1.7).

Задача 2. Визначити абсолютний тиск p на поверхні води у посудині (рис. 1.8) і вакуум при різниці рівнів води та ртуті $z_a = 0,5$ м і $z_b = 0,08$ м, якщо $\gamma_e = 1,0$ г/см³ і $\gamma_{рт}$ = 13,6 г/см³.

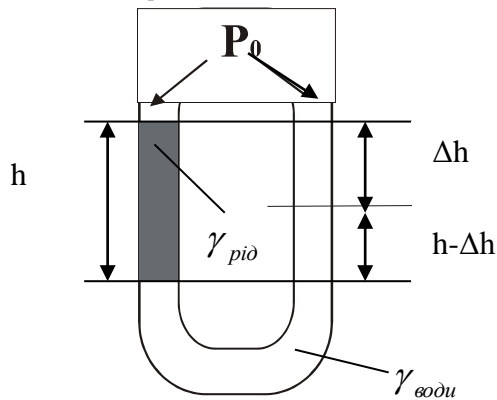


Рисунок 1.7 – Схема скляної U-подібної трубки для задачі 1

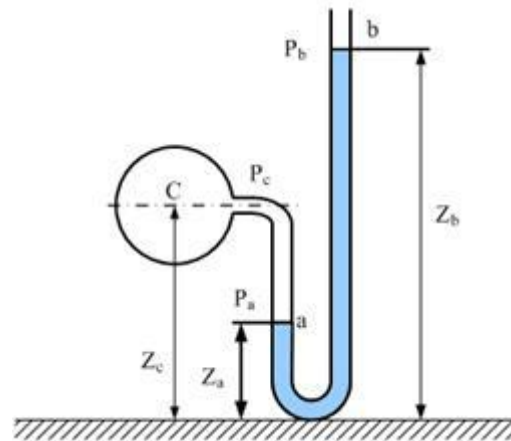


Рисунок 1.8 – Схема посудини для задачі 2

Задача 3. Бензин у гаражі зберігається у спеціальному резервуарі (рис. 1.9). Визначити висоту стовпа H бензину у резервуарі, якщо манометр, приєднаний до нього, показує тиск $P_m = 0,25$ кг/см². Тиск на вільну поверхню бензину атмосферний. Питома вага бензину $\gamma = 755$ кг/м³. Манометр приєднаний на відстані 0,2 м від дна резервуара.

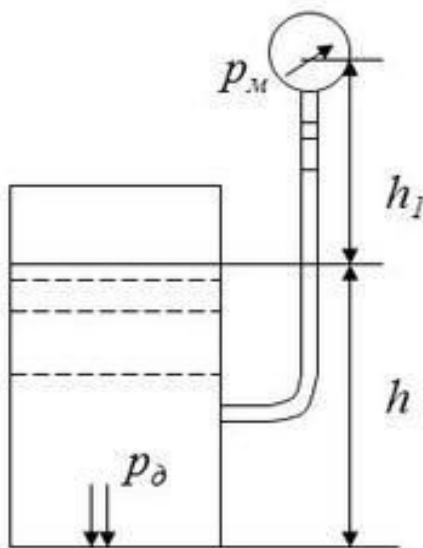


Рисунок 1.9 – Схема резервуара для задачі 3

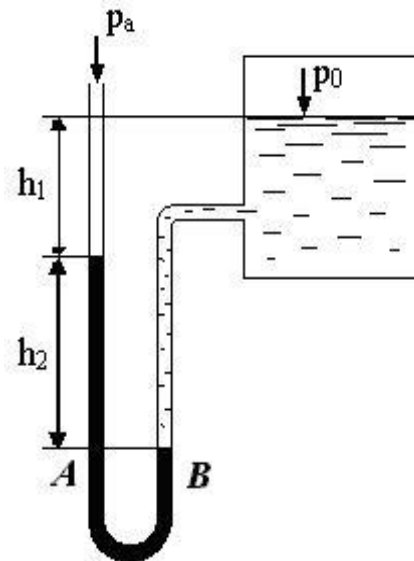


Рисунок 1.10 – Схема ртутного манометра для задачі 6

Задача 4. Визначити надлишковий тиск на дно посудини, якщо пружинний манометр, підімкнений до посудини на висоті $h = 1,0$ м від дна, показує тиск $P_m = 157\,000$ Н/м² (1,6 кг/см²), а центр манометра розташовується вище точки його підімкнення до посудини на $z = 1,0$ м.

Задача 5. Визначити, на яку висоту підніметься гліцерин у трубці, якщо тиск на вільну поверхню рідини у закритій посудині $p_0 = 79\,676,5 \text{ н/м}^2$ ($0,812 \text{ кг/см}^2$).

Задача 6. Визначити висоту h_2 в U-подібному ртутному манометрі (рис. 1.10), якщо $h_1 + h_2 = 400 \text{ мм}$, а $P_0 = 107\,400 \text{ н/м}^2$ ($1,096 \text{ кг/см}^2$).

Задача 7. Вода подається до споруди сталевую клепаною трубою діаметром $d = 0,90 \text{ м}$, яка повинна витримувати манометричний тиск $p_m = 10 \text{ ат}$. Визначити товщину стінки трубопроводу, якщо допустиме напруження $\sigma = 800 \text{ кг/см}^2$.

Задача 8. Бак для води склепаний з чотирьох рядів листової сталі при висоті кожного ряду $a = 1,5 \text{ м}$. Визначити товщину стінки нижнього ряду, якщо бак наповнений водою доверху. Діаметр бака $d = 8 \text{ м}$. Допустиме напруження на розрив $\sigma = 800 \text{ кг/см}^2$.

Задача 9. Визначити силу гідростатичного тиску на квадратний щит, який закриває отвір у похилій плоскій стіні (рис. 1.11), а також глибину занурення центра тиску при таких вимогах: $d = 0,3 \text{ м}$, $a = 1 \text{ м}$; $\alpha = 45^\circ$; питома вага води $\gamma = 1 \text{ т/м}^3$.

Задача 10. Бокова стіна резервуара має прямокутний отвір шириною $b = 1,2 \text{ м}$ і висотою $h = 1,0 \text{ м}$ (рис. 1.12), яке закривається щитом, який обертається і притискається вантажем G . Довжина важеля $r = 1,5 \text{ м}$. Глибина води в резервуарі $H = 3,2 \text{ м}$, підвищення осі обертання щита $a = 0,2 \text{ м}$. Визначити силу G і повне зусилля R , на яке розраховані шипи осі $O-O$.

Задача 11. Трикутний отвір, утворений зрізом кута резервуара, закрито трикутним щитом із кутом нахилу $\alpha = 30^\circ$ до вертикалі (рис. 1.13). Основа a і висота b трикутного отвора дорівнює $2,0 \text{ м}$. Щит обертається навколо осі $O-O$ і утворюється цепом на відстані $n = 2,0 \text{ м}$ від основи трикутника та натягнутій під кутом $\beta = 120^\circ$ до щита. Знайти натяг цепу T і реакцію R осі $O-O$ при напорі $H = 3,2 \text{ м}$.

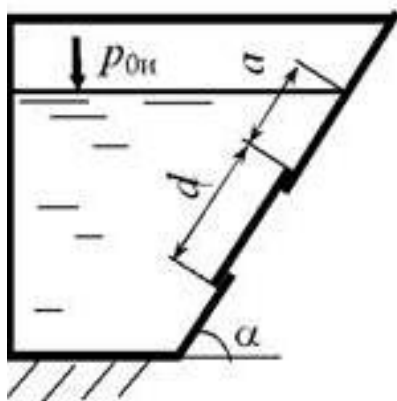


Рисунок 1.11 – Схема резервуара до задачі 9

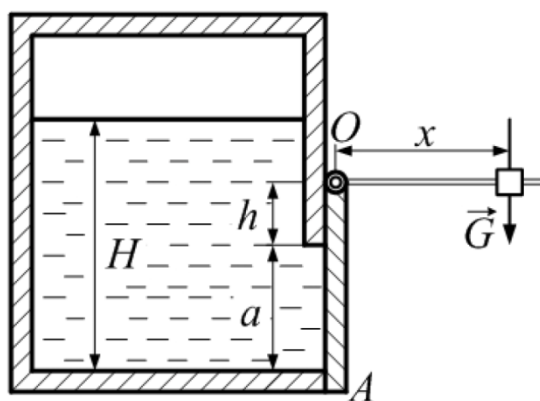


Рисунок 1.12 – Схема резервуара до задачі 10

Задача 12. У резервуарі, схема якого зображена на рисунку 1.14, висота стовпа бензину $H = 5 \text{ м}$, питома вага якого $\gamma = 725 \text{ кг/м}^3$. У резервуарі є газ, який закритий кришкою $D = 0,8 \text{ м}$. Від дна резервуара до центра ваги лазу

$h = 0,9$ м. Кришка утримується болтами, кількість яких $n = 6$. Визначити силу тиску на кришку лаза і положення центра тиску. Знайти діаметр болтів, якщо допустиме напруження на розрив для болтів $\sigma = 750$ кг/см².

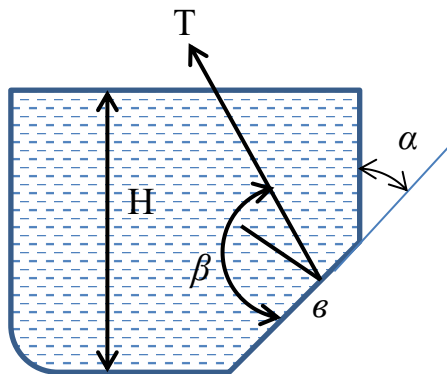


Рисунок 1.13 – Схема резервуара до задачі 11

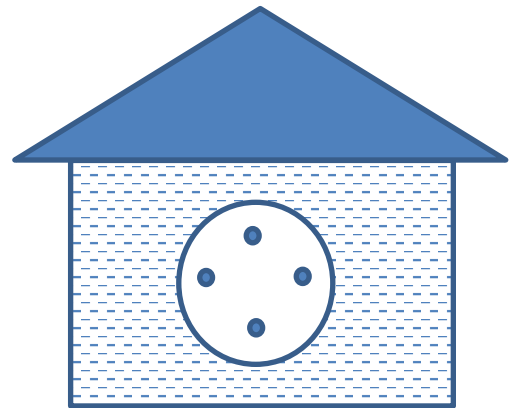


Рисунок 1.14 – Схема резервуара до задачі 12

Задача 13. Автогосподарство має бензосховище, випуск бензину з якого відбувається за допомогою труби діаметром $d = 300$ мм. Труба закрита відкидним клапаном, розташованим під кутом $\alpha = 45^\circ$ до горизонту (рис. 1.15). Глибина занурення центра ваги О клапана $H = 3$ м. Питома вага бензину $\gamma = 752$ кг/м³. Визначити силу T , яку треба прикласти до троса для відкриття клапана.

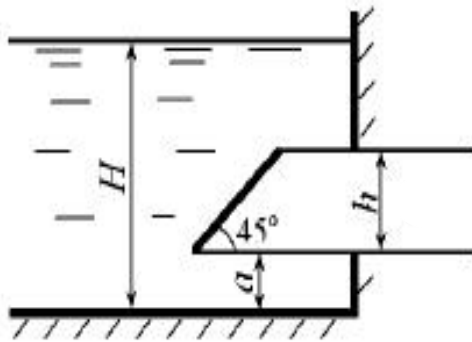


Рисунок 1.15 – Схема резервуара до задачі 13

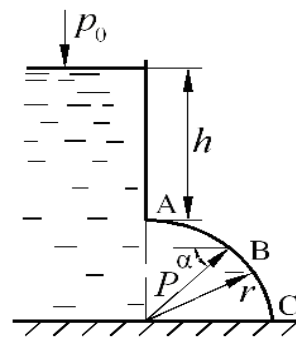


Рисунок 1.16 – Схема резервуара до задачі 14

Задача 14. Для зберігання бензину у гаражі використовується резервуар, який має фасонну частину у вигляді четвертої частини циліндра (рис. 1.16). Радіус циліндра $r = 0,5$ м, довжина утворюючої $b = 0,9$ м. Висота стовпа бензину у резервуарі $H = 1,4$ м. Питома вага бензину $\gamma = 0,75$ т/м³.

Визначити силу гідростатичного тиску бензину на фасонну частину резервуара та глибину занурення центра тиску.

Задача 15. Визначити силу гідростатичного тиску води на квадратний затвор та глибину занурення центра тиску. Радіус затвора $r = 2,5$ м. Довжина затвора $b = 4$ м. Глибина води $H = r$. Питома вага води $\gamma = 1$ т/м³.

Задача 16. Сегментний щит АВ радіуса $r = 7,5$ м підтримує воду при її глибині 4,8 м (рис. 1.17).

Центральний кут сектора $\varphi = 43^\circ$. Горизонтальна проєкція щита $a = 2,7$ м. Ширина щита $b = 6,4$ м. Визначити силу тиску води на щит і знайти місце розташування центра тиску.

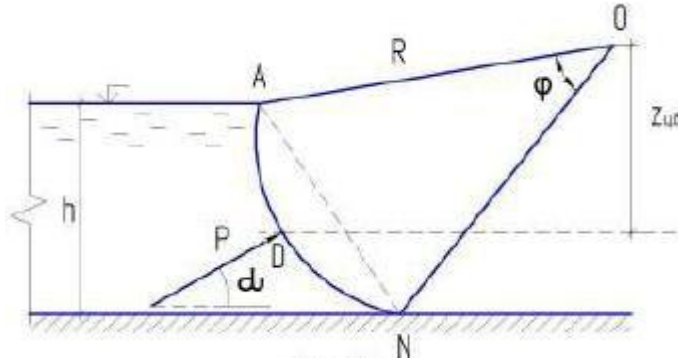


Рисунок 1.17 – Схема резервуара до задачі 16

Запитання для самоперевірки

1. Подайте визначення гідравліки як науки.
2. Що таке питома маса і питома вага рідин і газів?
3. Що таке стиснутість, пружність? Якими параметрами вони характеризуються?
4. Що таке динамічна і кінетична в'язкість? Який між ними зв'язок?
5. Як впливають тиск і температура на в'язкість рідин і газів?
6. Подайте визначення нев'язкої рідини.
7. Назвіть сили, які діють в рідині?
8. Що таке гідростатичний тиск? Яка його розмірність?
9. Що таке п'єзометрична висота?
10. Запишіть основне рівняння гідростатики.
11. Як визначити тиск на плоску стінку? Як знаходять центр тиску?
12. У чому полягає суть визначення сили тиску на криволінійну поверхню?
13. Що треба розуміти під термінами «плавучість» і «остійність» плаваючих тіл?
14. Якими приладами вимірюється гідростатичний тиск?
15. Що таке центр тиску?
16. Що таке підйомна сила?
17. Сформулюйте закон Архімеда.
18. За якою формулою визначається тиск на горизонтальне дно посуду?

1.6 Види руху рідини

Кінематикою рідини називають розділ гідравліки, у якому вивчають можливі види й форми руху рідини та газу незалежно від діючих сил.

У кінематиці рідини вивчають геометричні та кінематичні властивості руху.

Виокремлюють два види руху – *несталий і сталий*.

Несталим називають такий рух, при якому всі гідравлічні характеристики (швидкість, тиск, глибина потоку) в будь-якій точці потоку змінюється в часі, тобто

$$v = f_1(x, y, z, t); p = f_2(x, y, z, t); h = f_3(x, y, z, t).$$

Несталий рух є найбільш поширеним і складним видом руху в природі і техніці.

Сталим називають такий рух, при якому всі гідравлічні характеристики постійні в часі і будь-якій точці потоку.

Сталий рух, у свою чергу, можна поділити на *рівномірний і нерівномірний*.

Під *рівномірним* рухом в гідравліці розуміють такий рух, при якому швидкість, тиск, а також їх розподіл за перерізом у разі постійної форми та розмірів живого перерізу не змінюється вздовж шляху руху рідини.

Нерівномірним рухом називають рух рідини, при якому швидкість, а також її розподіл за перерізом та всі гідравлічні характеристики не постійні вздовж шляху.

Залежно від сил, які зумовлюють рух, та наявності поверхонь, що обмежують потік, розрізняють *напірний і безнапірний* рухи.

1.7 Лінії та трубки течії

Крива, яка дає змогу визначити напрям дійсних місцевих швидкостей в усіх точках цієї кривої, називають *лінією течії*. В умовах сталого руху лінії течії не змінюють свого обрису в потоці. При несталому русі лінії течії та траєкторії не суміщаються, як при стаціонарному русі.

Сукупність ліній течії для будь-якого руху називають *спектром течії*.

Поверхню, утворену лініями течії, проведеними через усі точки цього замкненого контуру, називають *трубкою течії*, а масу рідини, що протікає всередині трубки течії, – *елементарним струменем*. Елементарний струмінь є наочним кінематичним образом, який істотно полегшує вивчення руху рідини і є базовим для так званої струминної моделі руху рідини.

1.8 Гідравлічні характеристики потоку рідини

Живим перерізом ω називають площу поперечного перерізу, нормального до напрямку руху.

Змоченим периметром χ називають ту частину периметра живого перерізу, по якій рідина стикається зі стінками, що її обмежують.

Кількість рідини W , яка протікає через живий переріз потоку за одиницю часу t , називають *витратою потоку*, Q м³/с.

$$Q = \frac{W}{t}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (1.43)$$

Середня швидкість – це уявна величина, однакова для всіх точок живого перерізу, при якій пропускається така сама кількість рідини, як і при дійсних швидкостях, тобто

$$V = \frac{Q}{\omega} = \frac{1}{\omega} \int U d\omega . \quad (1.44)$$

Гідравлічним радіусом R називають відношення площі живого перерізу до змоченого периметра, тобто

$$R = \frac{\omega}{\chi} . \quad (1.45)$$

При сталому русі нев'язкої рідини витрата за всіма живими перерізами однакова:

$$Q = V_1 \omega_1 = V_2 \omega_2 = \dots V_n \omega_n = const , \quad (1.46)$$

де $V_1, V_2, \dots V_n$ – середня швидкість в усіх живих перерізах потоку $\omega_1, \omega_2, \dots \omega_n$.

З цього рівняння випливає:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \dots = const . \quad (1.47)$$

1.9 Рівняння Д. Бернуллі

Рівняння Д. Бернуллі пояснює зв'язок між тиском, середньою швидкістю і геометричною висотою в різних перерізах потоку і є основним рівнянням практичної гідродинаміки. Записане для двох перерізів – 1-1 та 2-2 воно має такий вигляд:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha V_2^2}{2g} + \Sigma h_w^{1-2} = H = const , \quad (1.48)$$

де z – геометрична висота, яка характеризує потенційну енергію положення одиниці ваги рідини (питома енергія положення);

$\frac{p}{\gamma}$ – п'єзометрична висота, яка характеризує потенційну енергію тиску

одиниці ваги рідини (питома енергія тиску);

$\frac{\alpha V^2}{2g}$ – висота швидкісного напору, яка характеризує кінетичну енергію

одиниці ваги рідини (питома кінетична енергія);

Σh_w^{1-2} – втрачена висота, яка характеризує енергію одиниці ваги, витрачену на подолання гідравлічних опорів між двома перерізами (питома енергія тертя);

α – коефіцієнт нерівномірного розподілу швидкостей по перерізу потоку (коефіцієнт Коріоліса).

Геометричний зміст рівняння Бернуллі.

При сталому русі рідини сума чотирьох висот кожного живого перерізу потоку є величина постійна і дорівнює повному напору:

$$z + \frac{p}{\gamma} + \frac{\alpha V^2}{2g} + \Sigma h_w^{1-2} = H. \quad (1.49)$$

Фізичний зміст рівняння Бернуллі: при сталому русі рідини сума чотирьох питомих енергій залишається незмінною вздовж потоку і дорівнює загальному запасу питомої енергії.

За допомогою рівняння Бернуллі вирішується більшість завдань практичної гідравліки.

До рівняння Бернуллі входить величина Σh_w^{1-2} , яка вміщує суму втрат:

а) втрати опору за довжиною h_l – втрати, витрачені на подолання опору тертя;

б) місцеві втрати напору h_m – втрати, які спричиняються різким змінюванням конфігурації меж потоку:

$$\Sigma h_w^{1-2} = h_l + h_m. \quad (1.50)$$

1.10 Режими руху рідини

Існують два режими руху рідини – ламінарний та турбулентний. При ламінарному режимі рідина рухається струмочками, які не змішуються. При турбулентному режимі, навпаки, існує сильне змішування часточок рідини.

Для визначення різновиду руху використовують число Рейнольдса:

$$Re = \frac{V \cdot l}{\nu}, \quad (1.51)$$

де l – характерний розмір потоку, м;

ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості рідини, м²/с.

Для труб круглого перерізу число Рейнольдса розраховують за формулою

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu}. \quad (1.52)$$

Для інших видів перерізів (для відкритих русел)

$$Re = \frac{V \cdot R}{\nu} \quad (1.53)$$

або

$$Re = \frac{V \cdot d_{екв}}{\nu}, \quad (1.54)$$

де $d_{екв}$ – еквівалентний (гідравлічний діаметр).

Критичні значення числа Рейнольдса дорівнюють:

– для напірних потоків, формула (1.52) – $Re_{кр} = 2\,000$ – $2\,400$;

– для безнапірних потоків, формули (1.53) – (1.54) – $Re_{кр} = 500$ – 600 .

Приклад 1. Визначити витрату води Q в трубі з діаметром $d_1 = 250$ мм, яка плавно звужується до діаметра $d_2 = 125$ мм, покази п'єзометрів: до звуження $h_1 = 50$ см; у звуженні $h_2 = 30$ см, температура води 20 °С (рис. 1.18).

Розв'язання. Запишемо рівняння Бернуллі для перерізів 1-1 і 2-2, приймаємо за площину відліку вісь труби:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha V_2^2}{2g} + \Sigma h_w^{1-2}$$

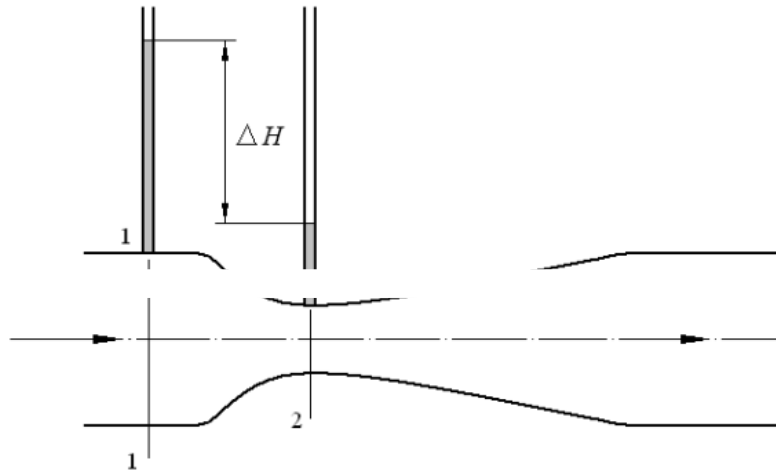


Рисунок 1.18 – Схема витратоміру Вентурі (до прикладу 1)

$Z_1 = Z_2 = 0$, $h_w^{1-2} = 0$ та $\alpha = 1$. Отримаємо:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{p_2}{\gamma} = \frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g}$$

Із рівняння нерозривності потоку $\omega_1 V_1 = \omega_2 V_2$:

$$\omega_1 = \frac{\pi d_1^2}{4}; \quad \omega_2 = \frac{\pi d_2^2}{4}$$

Підставимо ці значення у попереднє рівняння нерозривності потоку:

$$V_2 = V_1 \frac{d_1^2}{d_2^2}$$

Тоді рівняння Бернуллі запишемо так:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{p_2}{\gamma} = \Delta H$$

$$\Delta H = \frac{V_1^2}{2g} \left(\frac{d_1^4}{d_2^4} - 1 \right)$$

Звідки

$$V_1 = \sqrt{\frac{2g \cdot \Delta H}{\frac{d_1^4}{d_2^4} - 1}}$$

Витрата води у трубі:

$$Q = \omega_1 V_1 = \frac{\pi d_1^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2g \cdot \Delta H}{\frac{d_1^4}{d_2^4} - 1}}$$

$$Q = \frac{3,14 \cdot 0,25^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \cdot 0,2}{0,25^4} - 1} = 0,0245 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Приклад 2. Конденсатор парової турбіни, змонтований на електростанції, обладнаний 8 186-ма охолоджувальними трубами діаметром $d = 0,025$ м. За нормальних умов роботи через конденсатор проходить 13 600 м³/с циркуляційної води з температурою 12,5–13°. Чи буде забезпечений турбулентний режим руху у трубах?

Розв'язання. Витрата через конденсатор

$$Q = 13\,600 / 8\,186 = 3,78 \text{ м}^3/\text{с}.$$

А через кожну трубку

$$q = 3,78 / 8\,186 = 0,000\,462 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Площа перерізу кожної трубки

$$\omega = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,025^2}{4} = 0,00049 \text{ м}^2.$$

Швидкість руху води

$$V = \frac{q}{\omega} = \frac{0,000462}{0,00049} = 0,945 \text{ м/с}.$$

Кінематична в'язкість води $\nu = 1,23 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ (за дод. Г).

Число Рейнольдса

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu} = \frac{0,945 \cdot 0,025}{1,23 \cdot 10^{-6}} = 19200$$

Таким чином, $Re > Re_{кр} = 19\,200 > 2\,320$, тобто рух води буде турбулентним.

1.11 Втрати напору за довжиною

Рівномірний рух рідини спостерігається у тих випадках, коли живий переріз за довжиною незмінний (наприклад, напірні труби, де діаметр незмінний).

Коли рух рідини у трубах рівномірний, то втрати опору на тертя за довжиною h_l як при турбулентному, так і ламінарному русі визначаються для круглих труб за формулою Дарсі – Вейсбаха:

$$h_l = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{V^2}{2g}, \quad (1.55)$$

а для труб будь-якої іншої форми перерізу за формулою

$$h_l = \lambda \frac{l}{4R} \cdot \frac{V^2}{2g} = \lambda \frac{l}{d_{екв}} \cdot \frac{V^2}{2g}; \quad (1.56)$$

у деяких випадках використовують формулу

$$h_l = \frac{V^2}{C^2 \cdot R} \cdot l; \quad (1.57)$$

втрати тиску на тертя за довжиною визначають за формулою

$$\Delta p_l = \lambda \frac{l}{d_{екв}} \rho \frac{V^2}{2}, \quad (1.58)$$

де λ – коефіцієнт гідравлічного тертя;

l – довжина ділянки труби або каналу;

d – діаметр труби;

V – середня швидкість течії;

R – гідравлічний радіус;

$d_{екв}$ – еквівалентний діаметр;

C – коефіцієнт Шезі, пов'язаний з коефіцієнтом гідравлічного тертя λ залежністю

$$C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}}, \quad (1.59)$$

$$\lambda = \frac{8g}{C^2}. \quad (1.60)$$

Розмірність коефіцієнта Шезі – $m^{1/2}/c$.

Зв'язок між коефіцієнтами λ і C подано у додатку П.

Коефіцієнт гідравлічного тертя λ враховує втрату опору по довжині всіх факторів, які не були відображені у формулах (1.55) – (1.57), але важливі при визначенні гідравлічних опорів. Найважливішими з них є в'язкість рідини та стан стінок труби.

Для турбулентного та ламінарного руху рідини застосовують різні формули.

Турбулентний рух. При турбулентному русі у напірному трубопроводі круглого перерізу коефіцієнт гідравлічного тертя λ , який входить до формули Дарсі – Вейсбаха, залежить від двох параметрів, які не мають розмірності, – числа Рейнольдса та відносної шорсткості $K_{\text{в}}/d$, тобто

$$\lambda = f\left(\text{Re}; \frac{\Delta_{екв}}{d}\right), \quad (1.61)$$

де $\Delta_{екв}$ – еквівалентна рівномірно-зерниста абсолютна шорсткість.

Під еквівалентною рівномірно-зернистою шорсткістю розуміють таку висоту виступів шорсткості, яка складається з піщинок однакового розміру та дає при розрахунках за формулою (1.62) однакову із заданою шорсткістю величину λ .

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{2,5}{\text{Re} \cdot \sqrt{\lambda}} + \frac{\Delta_{екв}}{3,7d} \right). \quad (1.62)$$

Для визначення коефіцієнта гідравлічного тертя λ при різних режимах руху рідини у напірних трубах рекомендують певні формули (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Формули для визначення коефіцієнта гідравлічного тертя λ при різних режимах руху рідини у напірних трубах

Режим руху	Число Рейнольдса	Формула для визначення коефіцієнта гідравлічного тертя λ
Ламінарний	$Re < 2\ 300$	$\lambda = \frac{64}{Re}$
Перехідний	$2\ 300 < Re < 4\ 000$	Проектування трубопроводів не рекомендується
Турбулентний	1-ша область $4000 < Re < 10 \frac{d}{\Delta_{екв}}$	Формула Блазіуса $\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}$ Формула Коначова: $\lambda = \frac{1}{(1,81 \cdot \lg Re - 1,5)^2}$
	2-га область $10 \frac{d}{\Delta_{екв}} < Re < 560 \frac{d}{\Delta_{екв}}$	Формула Альтшуля: $\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta_{екв}}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}$
	3-тя область $Re > 560 \frac{d}{\Delta_{екв}}$	Формула Альтшуля: $\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta_{екв}}{d} \right)^{0,25}$; Формула Нікурадзе: $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{\Delta_{екв}}{3,71d} \right)$

Приклад 1. Вентиляційна труба $d = 0,1$ м (100 мм) має довжину $l = 100$ м. Визначити тиск, який повинен розвинути вентилятор, якщо витрата повітря $Q = 0,078$ м³/с. Тиск на виході $p = p_{атм} = 101$ кПа. Місцевих опорів немає. Температура повітря – 20 °С.

Розв'язання. Знайдемо швидкість повітря у трубі:

$$V = \frac{Q}{\omega} = \frac{0,078 \cdot 4}{3,14 \cdot 0,1^2} = 10 \text{ м/с.}$$

Число Рейнольдса для потоку повітря у трубі при $\nu = 15,7 \cdot 10^{-6}$ м²/с

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu} = \frac{10 \cdot 0,1}{15,7 \cdot 10^{-6}} = 69000$$

Відносна шорсткість $\Delta_{екв} = 0,2$ мм.

$$\frac{\Delta_{екв}}{d} = \frac{0,2}{100} = 0,002$$

Коефіцієнт гідравлічного тертя

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta_{екв}}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25} = 0,11 (0,002 + 0,001)^{0,25} = 0,0256$$

За формулою (1.58) знайдемо витрати тиску на тертя ($\rho = 1,18 \text{ кг/м}^3$):

$$\Delta p_l = \lambda \frac{l}{d_{екв}} \rho \frac{V^2}{2} = 0,0256 \cdot \frac{100}{0,1} \cdot 1,18 \cdot \frac{10^2}{2} \approx 1410 \text{ Па} = 1,41 \text{ кПа.}$$

Приклад 2. Витрата рідини при температурі 10°C у трубі кільцевого перерізу, яка складається з двох концентричних оцинкованих сталевих труб (при $\Delta_{екв} = 0,15 \text{ мм}$), становить $Q = 0,0075 \text{ м}^3/\text{с}$. Внутрішня труба має зовнішній діаметр $d = 0,075 \text{ м}$, а зовнішня труба має внутрішній діаметр $D = 0,1 \text{ м}$. Знайти витрати тиску на тертя за довжиною труби при $l = 300 \text{ м}$.

Розв'язання. Площа живого перерізу

$$\omega = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) = \frac{3,14}{4} (0,1^2 - 0,075^2) = 0,0034 \text{ м}^2.$$

Змочений периметр живого перерізу

$$\chi = \pi(D + d) = 3,14 \cdot (0,1 + 0,075) = 0,55 \text{ м.}$$

Еквівалентний діаметр

$$d_{екв} = 4R = 4 \frac{\omega}{\chi} = 4 \frac{0,0034}{0,55} = 2,48 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

Відносна шорсткість

$$\frac{\Delta_{екв}}{d_{екв}} = \frac{1,5 \cdot 10^{-4}}{2,48 \cdot 10^{-2}} = 0,0059.$$

Середня швидкість руху

$$V = \frac{Q}{\omega} = \frac{0,0075}{0,0034} = 2,2 \text{ м/с.}$$

Число Рейнольдса при $\nu = 1,31 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ (вода)

$$Re = \frac{V \cdot d_{екв}}{\nu} = \frac{2,2 \cdot 2,5 \cdot 10^{-2}}{1,21 \cdot 10^{-6}} = 42000$$

Коефіцієнт гідравлічного тертя

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta_{екв}}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25} = 0,11 \left(0,0059 + \frac{68}{42000} \right)^{0,25} = 0,0284$$

Втрати тиску на тертя за довжиною визначаємо за формулою

$$h_l = \lambda \frac{l}{d_{екв}} \cdot \frac{V^2}{2g} = 0,0284 \cdot \frac{300 \cdot 2,2^2}{2,48 \cdot 10^{-2} \cdot 2 \cdot 9,81} = 8,4 \text{ м.}$$

Приклад 3. Визначити витрату води у трубі прямокутного поперечного перерізу зі співвідношенням сторін $a : b = 0,25$ і у круглій трубі при тій самій площі поперечного перерізу $\omega = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, якщо втрати тиску в цих трубах однакові та дорівнюють $\Delta p_l = 100 \text{ Па}$, а довжина кожної труби $l = 10 \text{ м}$. Температура води – $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Розв'язання. Для труби круглого перерізу $d_{\text{екв}} = d$; для труби прямокутного перерізу при $a : b = 0,25$.

$$d_{\text{екв}} = \frac{4ab}{2(a+b)} = \frac{2ab}{a+b} = 1,6a$$

Еквівалентні діаметри для цих труб такі:

$$d_{\text{екв}}^{\text{круг}} = \sqrt{\frac{4\omega}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2 \cdot 10^{-4}}{3,14}} = 1,6 \cdot 10^{-2} \text{ м};$$

$$d_{\text{екв}}^{\text{прямокут}} = 1,6 \sqrt{\frac{\omega}{4}} = 1,6 \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-4}}{4}} = 1,1 \cdot 10^{-2} \text{ м}.$$

Втрати тиску визначаємо за формулою (1.58). Прийнемо, що рух рідини у трубах ламінарний. Тоді за формулою $\lambda = \frac{A}{\text{Re}}$, де значення коефіцієнта форми A (дод. Г) для круглих труб – 64, для прямокутних – 73.

Формула втрат тиску набуває такого вигляду:

$$\Delta p_l = \frac{A}{\text{Re}} \cdot \frac{l}{d_{\text{екв}}} \rho \frac{V^2}{2} = \rho \frac{A \cdot l \cdot v}{2d_{\text{екв}}^2} V.$$

Для круглої труби при питомій масі води $\rho = 998,2 \text{ кг/м}^3$ (див. дод. А) та в'язкості $\nu = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ (дод. Г)

$$V = \frac{\Delta p_l \cdot 2d_{\text{екв}}^2}{\rho \cdot A \cdot l \cdot \nu} = \frac{2 \cdot 100 \cdot (1,6 \cdot 10^{-2})^2}{998,2 \cdot 64 \cdot 10 \cdot 10^{-6}} = 0,08 \text{ м/с}.$$

Для прямокутної труби

$$V = \frac{2 \cdot 100 \cdot (1,1 \cdot 10^{-2})^2}{998,2 \cdot 73 \cdot 10 \cdot 10^{-6}} = 0,032 \text{ м/с}.$$

Визначимо число Рейнольдса:

– для круглих труб:

$$\text{Re} = \frac{V \cdot d_{\text{екв}}}{\nu} = \frac{0,08 \cdot 1,6 \cdot 10^{-2}}{10^{-6}} = 1280$$

– для прямокутних труб:

$$\text{Re} = \frac{V \cdot d_{\text{екв}}}{\nu} = \frac{0,032 \cdot 1,1 \cdot 10^{-2}}{10^{-6}} = 350$$

Оскільки число Рейнольдса менше квадратичного, що дорівнює 2 000, режим течії в трубах, як і припускали, ламінарний.

Витрата води:

– у круглій трубі:

$$Q = V \cdot \omega = 0,082 \cdot 2 \cdot 10^{-4} = 1,6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с};$$

– у прямокутній трубі:

$$Q = V \cdot \omega = 0,03 \cdot 2 \cdot 10^{-4} = 0,64 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Таким чином, в умовах ламінарного руху при однаковій площі живого перерізу і однакових втратах тиску кругла труба пропускає у 2,5 рази більше води, ніж прямокутна труба.

Приклад 4. Визначити втрати тиску за довжиною у новому сталевому трубопроводі (еквівалентна шорсткість $\Delta_{\text{екв}} = 0,1$ мм) діаметром $d = 200$ мм і довжиною $l = 2$ км, якщо ним транспортують воду з витратою $Q = 20$ л/с. Кінематичний коефіцієнт в'язкості води $\nu = 0,01$ см²/с.

Як зміняться втрати напору, якщо цим самим трубопроводом буде транспортуватись нафта з тими самими витратами. Кінематичний коефіцієнт в'язкості нафти $\nu = 1$ см²/с.

Розв'язання. Знайдемо середню швидкість потоку:

Число Рейнольдса при транспортуванні води

$$V = \frac{Q}{\omega} = \frac{20000 \cdot 4}{3,14 \cdot 10^2} = 64 \text{ см/с},$$

$$\text{Re} = \frac{V \cdot d}{\nu} = \frac{64 \cdot 20}{0,01} = 128000$$

що відповідає турбулентному потоку.

Визначаємо коефіцієнт гідравлічного тертя за формулою А. Д. Альдшуля:

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta_{\text{екв}}}{d} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25} = 0,11 \left(\frac{0,1}{200} + \frac{68}{128000} \right)^{0,25} = 0,0198$$

Втрати тиску

$$h_l = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{V^2}{2g} = 0,0198 \cdot \frac{2000}{0,2} \cdot \frac{0,64^2}{2 \cdot 9,81} = 4,16 \text{ м вод. ст.}$$

При транспортуванні нафти число Рейнольдса

$$\text{Re}_{\text{наф}} = \frac{V \cdot d}{\nu_{\text{наф}}} = \frac{64 \cdot 20}{1} = 1280$$

Отже, режим руху нафти – ламінарний.

Коефіцієнт гідравлічного тертя

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}} = \frac{64}{1280} = 0,05$$

Втрати тиску за довжиною

$$h_l = 0,05 \cdot \frac{2000}{0,2} \cdot \frac{0,64^2}{2 \cdot 9,81} = 10,45 \text{ м нафт. ст.}$$

1.12 Місцеві втрати напору у трубах

Місцеві втрати напору обумовлюються подоланням місцевих опорів, які створюються фасонними частинами, арматурою та іншим обладнанням на трубопроводах. Місцеві опори спричиняють зміну величини та напрямку швидкості руху рідини на окремих ділянках трубопроводу, що пов'язано з появою додаткових втрат напору. Рух у трубопроводі за наявності місцевих опорів нерівномірний. Втрати напору в місцевих опорах h_M (місцеві втрати напору) визначають за формулою Вейсбаха:

$$h_M = \sum \xi \frac{V^2}{2g}, \text{ м}, \quad (1.63)$$

де V – середня швидкість у перерізі, який розташований нижче по течії за опором, м/с;

ξ – безрозмірний коефіцієнт місцевого опору.

Для визначення втрат тиску Δp_M формула (1.63) набуде такого вигляду:

$$p_M = \sum \xi \rho \frac{V^2}{2g}, \text{ м}. \quad (1.64)$$

Значення коефіцієнтів місцевих опорів залежать від конфігурації місцевого опору і режиму руху. Цей режим визначається коефіцієнтом гідравлічного тертя λ , тобто числом Рейнольдса і відносною шорсткістю. Залежність коефіцієнтів місцевих опорів від числа Рейнольдса не постійна і у практичних розрахунках нею часто можна знехтувати. Більш значний вплив чисел Рейнольдса відчувається за невеликих їх значень, а також у разі постійного змінювання величини або напрямку швидкості (закруглений поворот, плавний вхід до труби).

Наведені далі значення коефіцієнтів опору належать до квадратичної області опорів.

Раптове розширення трубопроводу. Втрати напору при раптовому розширенні знаходять за формулою Борда:

$$h_{\text{рапт. розш.}} = \frac{\alpha_0 \cdot (V_1 - V_2)^2}{2g}, \text{ м}, \quad (1.65)$$

де α_0 – коефіцієнт кореляції, який становить відношення дійсної кінетичної енергії потоку в даному перерізі до кінетичної енергії того самого потоку в тому самому перерізі, але в разі рівномірного розподілу швидкості дорівнює 1,035;

V_1 і V_2 – середні швидкості руху до і після розширення.

Таким чином, втрата напору при раптовому розширенні трубопроводу дорівнює швидкісному напору від втраченої швидкості.

Раптове звуження трубопроводу. Коефіцієнт місцевого опору при раптовому звуженні

$$\xi_{\text{рапт. звуж.}} = \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)^2, \text{ м}, \quad (1.66)$$

де ε – коефіцієнт стискання струменя, який становить співвідношення площі перерізу стислого струменя у вузькому трубопроводі $\omega_{ст}$ до площі перерізу вузької труби ω_2 (рис. 1.19);

$$\varepsilon = \frac{\omega_{ст}}{\omega_2} \quad (1.66)$$

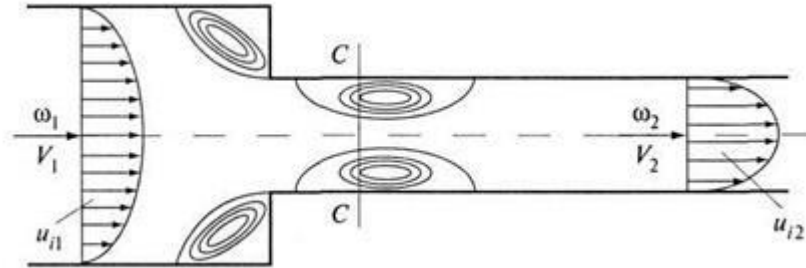


Рисунок 1.19 – Раптове звуження трубопроводу

Коефіцієнт стискання залежить від ступеня стискання потоку:

$$n = \frac{\omega_2}{\omega_1} \quad (1.67)$$

Значення коефіцієнта стискання залежно від співвідношення площ перерізів наведені у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Значення коефіцієнта стискання залежно від співвідношення площ перерізів

n	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
ε	0,609	0,613	0,618	0,623	0,631	6,42	0,656	0,678	0,713	0,785	1

Діафрагма на трубопроводі (рис. 1.20). Коефіцієнт місцевого опору діафрагми, розташованої всередині труби постійного перерізу

$$\xi_{діафр} = \left(\frac{1}{n \cdot \varepsilon} - 1 \right)^2, \text{ м}, \quad (1.68)$$

де $n = \omega_o/\omega$ – відношення площі отвору діафрагми ω_o до площі перерізу труби ω .

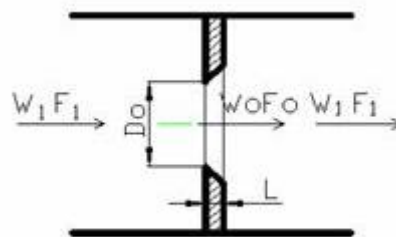


Рисунок 1.20 – Діафрагма на трубі постійного перерізу

Вхід у трубу з резервуара. Для коефіцієнта опору необхідно приймати такі значення:

- при гострих краях $\xi_{\text{вхід}} = 0,4-0,5$;
- при закруглених краях $\xi_{\text{вхід}} = 0,2$;
- при плавному вході $\xi_{\text{вхід}} = 0,05$.

Поступове розширення трубопроводу (дифузор). Коефіцієнт опору для труб, які конусно розходяться (дифузор), залежить від кута конусності та співвідношення діаметрів. Для коротких конусів коефіцієнт опору, відповідно до широкого перерізу, знаходимо за формулою

$$\xi_{\text{диф}} = k_{\text{диф}} \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} - 1 \right)^2, \text{ м.} \quad (1.69)$$

де $k_{\text{диф}}$ – коефіцієнт зм'якшення при поступовому розширенні, який залежить від кута конусності α (рис. 1.21), значення можна знайти у гідравлічному довіднику.

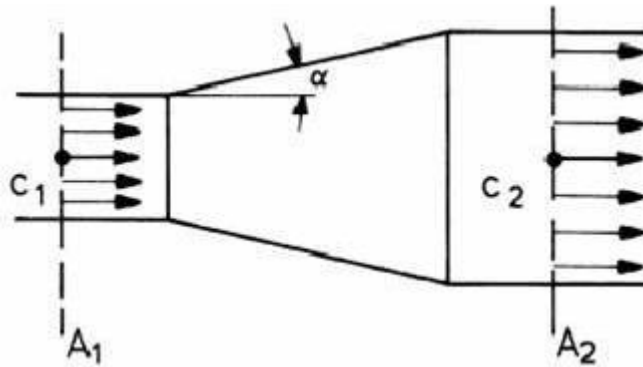


Рисунок 1.21 – Поступове розширення трубопровод

Для довгих конусів треба враховувати втрати опору за довжиною.

Поступове звуження трубопроводів. Коефіцієнт опору для перехідних конусів, які сходяться (конфузори) залежить від кута конусності та співвідношення діаметрів. Для коротких конусів його розраховують за формулою

$$\xi_{\text{конф}} = k_{\text{конф}} \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)^2, \text{ м,} \quad (1.70)$$

де $k_{\text{конф}}$ – коефіцієнт зм'якшення при поступовому звуженні, який залежить від кута конусності α (значення $k_{\text{конф}}$ наведені у гідравлічному довіднику).

Приклад 1. Як нагрівальні прилади систем опалення, використовують сталеві труби ($d_1 = 0,1$ м). Стояк, який підводить нагріту воду, і з'єднувальні лінії виконані з труб ($d_2 = 0,025$ м) і зварені з торцями нагрівальних труб (рис. 1.22). Визначити втрати тиску при раптовому розширенні трубопроводів, якщо швидкість руху гарячої води у з'єднувальних трубах $V = 0,3$ м/с, а температура води 80 °С.

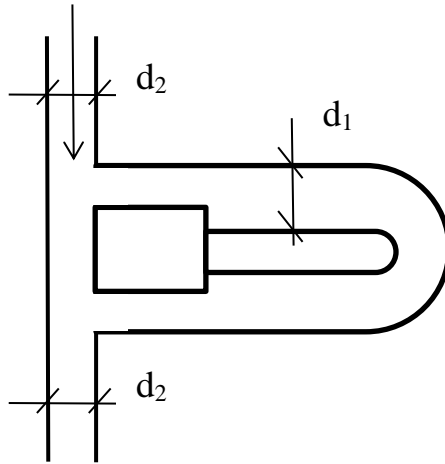


Рисунок 1.22 – Схема трубопроводів системи опалення до прикладу 1

Розв'язання. Кінетична в'язкість та питома маса води $\nu = 0,37 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, $\rho = 972 \text{ кг/м}^3$ при кімнатній температурі.

Число Рейнольдса у трубах, які підводять воду,

$$Re = \frac{V \cdot d_2}{\nu} = \frac{0,3 \cdot 0,025}{0,37 \cdot 10^{-6}} \approx 20000 .$$

Втрати тиску необхідно визначити за формулою Борда:

$$\Delta p = \frac{V_1^2}{2} \left(1 - \frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2 \rho = \frac{0,3^2}{2} \left(1 - \frac{0,025}{0,1}\right)^2 \cdot 972 = 41,8 \text{ Па}.$$

Приклад 2. Для обмеження витрати води на водопровідній лінії встановлюють діафрагму. Надлишковий тиск у трубі до і після діафрагми сталий і дорівнює $p_1 = 6,37 \cdot 10^4 \text{ Па}$ та $p_2 = 2,05 \cdot 10^4 \text{ Па}$. Діаметр труби $D = 0,076 \text{ м}$. Визначити необхідний діаметр отвору діафрагми d з таким розрахунком, щоб витрата води в лінії $Q = 0,0059 \text{ м}^3/\text{с}$.

Розв'язання. Втрати напору в діафрагмі

$$h = \frac{p_1 - p_2}{\rho \cdot g} = \frac{6,37 \cdot 10^4 - 2,05 \cdot 10^4}{998,2 \cdot 9,8} = 4,4 \text{ м}.$$

Швидкість води у трубі

$$V = \frac{4Q}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 0,0059}{3,14 \cdot 0,076^2} = 1,28 \text{ м/с}$$

З формули Вейсбаха

$$h = \Sigma \xi \frac{V^2}{2g} ,$$

маємо:

$$\xi_{\text{диаф}} = \frac{2gh}{V^2} = \frac{2 \cdot 9,8 \cdot 4,4}{1,28^2} = 52,3$$

Цьому значенню коефіцієнта опору ξ відповідає співвідношення:

$$n = \frac{d^2}{D^2},$$

яке можна визначити за формулою

$$\xi_{\text{діаф}} = \left(\frac{1}{n\varepsilon} - 1\right)^2 = 52,3,$$

де коефіцієнт стискання струменя визначаємо за формулою:

$$\varepsilon = 0,57 + \frac{0,043}{1,1 - n}.$$

Таким чином,

$$\left[\frac{1}{n \cdot \left(0,57 + \frac{0,043}{1,1 - n}\right)} + 1 \right]^2 = 52,3;$$

$$\frac{1}{n \cdot \left(0,57 + \frac{0,043}{1,1 - n}\right)} = 7,4 + 1 = 8,4;$$

$$1 = 4,79n + \frac{0,361}{1,1 - n};$$

$$n^2 - 1,32n + 0,23 = 0;$$

$$n = 0,66 - \sqrt{0,435 - 0,23} = 0,205.$$

Знаходимо діаметр отвору діафрагми:

$$d = D\sqrt{n} = 0,076\sqrt{0,205} = 0,0345 \text{ м.}$$

Коефіцієнт стискання струменя

$$\varepsilon = 0,57 + \frac{0,043}{1,1 - 0,205} = 0,618.$$

Приклад 3. Вода протікає по горизонтальній трубі, яка раптово звужується від $d_1 = 0,2$ м до $d_2 = 0,1$ м. Витрата води $Q = 0,002$ м³/с. Визначити, яку різницю рівнів ртуті $h_{\text{рт}}$ покаже диференціальний манометр, включений у місті зміни перерізу. Температура води 20 °С.

Розв'язання. Швидкість води в широкому перерізі труби

$$V_1 = \frac{4Q}{\pi d_1^2} = \frac{4 \cdot 0,002}{3,14 \cdot 0,2^2} = 0,69 \text{ м/с.}$$

Швидкість води у вузькому перерізі труби

$$V_2 = \frac{4Q}{\pi d_2^2} = \frac{4 \cdot 0,002}{3,14 \cdot 0,1^2} = 2,82 \text{ м/с.}$$

Ступінь стискання трубопроводу

$$n = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{d_2^2}{d_1^2} = \frac{0,1^2}{0,2^2} = 0,25$$

Коефіцієнт стискання струмини визначаємо за формулою

$$\varepsilon = 0,57 + \frac{0,043}{1,1 - n} = 0,57 + \frac{0,043}{1,1 - 0,25} = 0,62.$$

Коефіцієнт місцевого опору при раптовому звуженні

$$\xi_{\text{рапм.зв.}} = \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)^2 = \left(\frac{1}{0,62} - 1 \right)^2 = 0,37.$$

Рівняння Бернуллі для перерізи в 1-1 та 2-2 і площини порівняння, яка співпадає з віссю труби, буде таким:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + \xi_{\text{рапм.зв.}} \cdot \frac{V_2^2}{2}$$

Різниця п'єзометричних напорів:

$$H = \frac{p_1 - p_2}{\rho g} = \frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} + \xi_{\text{рапм.зв.}} \cdot \frac{V_2^2}{2g} = \frac{2,82^2}{19,6} - \frac{0,69^2}{19,6} + 0,37 \frac{2,82^2}{19,6} = 0,529 \text{ м.}$$

Покази ртутного манометра h_{pm} :

$$h_{pm} = \frac{H \cdot \rho_{\text{води}}}{\rho_{pm} - \rho_{\text{води}}} = \frac{0,529 \cdot 998,2}{13550 - 998,2} = 42,5 \text{ мм рт.ст.}$$

Приклад 4. Горизонтальна труба з діаметром $d_1 = 0,1$ м раптово переходить у трубу з діаметром $d_2 = 0,15$ м. Втрата води $Q = 0,03 \text{ м}^3/\text{с}$.

Визначити:

- втрати напору при раптовому розширенні труби;
- різницю тиску в обох трубах;
- втрати напору і різницю тиску у випадку, коли вода буде текти у протилежному напрямі (тобто з широкої труби у вузьку);
- різницю тиску при поступовому розширенні труби (знехтувавши втратами напору).

Розв'язання:

а) визначимо втрати напору при раптовому розширенні трубопроводу за формулою Борда:

$$h_{\text{роз}} = \frac{\alpha_0 (V_1 - V_2)^2}{2g},$$

$$V_1 = \frac{Q}{\omega_1} = \frac{0,03 \cdot 4}{3,14 \cdot 10^{-2}} = 3,84 \text{ м/с,}$$

$$V_2 = \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 V_1 = \left(\frac{0,1}{0,15} \right)^2 \cdot 3,84 = 1,75 \text{ м/с,}$$

$$h_{\text{роз}} = \frac{1,035 \cdot (3,84 - 1,75)^2}{2 \cdot 9,81} = 0,23 \text{ м};$$

б) знайдемо різницю тисків у вузькій і широкій трубах з рівняння Бернуллі:

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + h_{\text{роз}},$$

$$\frac{p_2 - p_1}{\rho g} = \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g} - h_{\text{роз}},$$

або

$$p_2 - p_1 = \frac{\rho(v_1^2 - v_2^2)}{2} - h_{\text{рам.под.}} \rho g,$$

$$p_2 - p_1 = \frac{998,2 \cdot (3,84^2 - 1,75^2)}{2} - 0,23 \cdot 998,2 \cdot 9,8 = 3245 \text{ Па};$$

в) при зміні напрямку руху на протилежний із широкої труби у вузьку швидкість у стиснутому перерізі

$$V_{\text{см}} = \frac{\omega_1}{\omega_{\text{см}}} V_1 = \frac{V_1}{\varepsilon}.$$

Ступінь стискання потоку

$$n = \frac{d_1^2}{d_2^2} = \frac{0,1^2}{0,15^2} = 0,446.$$

Коефіцієнт стискання потоку визначаємо за формулою

$$\varepsilon = 0,57 + \frac{0,043}{1,1 - n} = 0,64,$$

$$h_{\text{рам.зв.}} = \frac{(V_{\text{см}} - V_1)^2}{2g} = \frac{V_1^2}{2g} \left(\frac{\omega_1}{\omega_{\text{см}}} - 1 \right)^2 = \frac{V_1^2}{2g} \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)^2 = \frac{3,82^2}{2 \cdot 9,81} \left(\frac{1}{0,64} - 1 \right)^2 = 0,23 \text{ м}.$$

Різниця тиску –

$$\frac{p_2 - p_1}{\rho g} = \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g} + h_{\text{рам.зв.}} = 0,595 + 0,23 = 0,82 \text{ м},$$

$$p_2 - p_1 = 800 \text{ Па};$$

г) якщо забезпечити плавний перехід від вузького перерізу до широкого перерізу, то різниця тиску буде такою:

$$\frac{p_2 - p_1}{\rho g} = \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g} = \frac{10,86}{2 \cdot 9,81} = 0,595 \text{ м}.$$

Задачі для розв'язання

Задача 1. Визначити втрати тиску у водяному тракті водопідігрівача, який виконаний у вигляді шестипетльового трубчастого сталевго змійовика (рис. 1.23). Діаметр труб $d = 0,075\text{ м}$; довжина прямої ділянки $L = 3\text{ м}$; петлі з'єднуються круговими колінами, які мають радіуси $R = 0,1\text{ м}$. Витрата води $Q = 0,01\text{ м}^3/\text{с}$, температура – $90\text{ }^\circ\text{C}$.

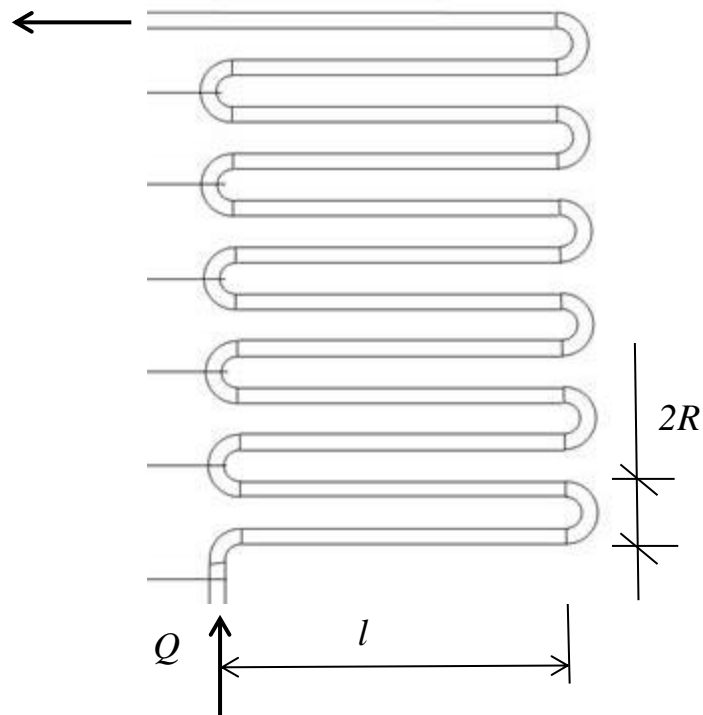


Рисунок 1.23 – Схема змійовика до задачі 1

Задача 2. Насос забирає з водойми воду з температурою $20\text{ }^\circ\text{C}$ у кількості $Q = 50\text{ л/с}$. Визначити максимальну висоту розташування горизонтального валу насоса над вільною поверхнею води H (рис. 1.24), якщо тиск перед насосом $P_2 = 0,3 \cdot 10^5\text{ Па}$. На всмоктувальній чавунній трубі з діаметром $d = 0,25\text{ м}$ і довжиною $L = 50\text{ м}$ є фільтруюча сітка, плавний поворот радіусом $R = 0,5\text{ м}$ та регулююча засувка, відкрита на 45% площі прохідного перерізу.

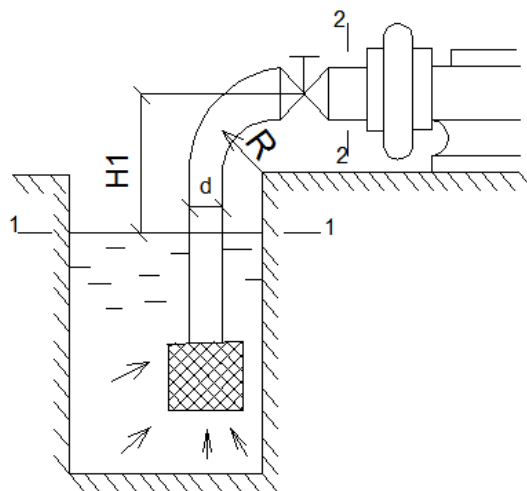


Рисунок 1.24 – Схема установки поверхневого насоса

Задача 3. Витрата гарячої води з температурою $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ через радіатор водяного опалення (рис. 1.25) $Q = 0,1\text{ м}^3/\text{с}$. Визначити втрати тиску між перерізами 1-1 та 2-2, якщо діаметр підвідних трубопроводів $d = 0,0125\text{ м}$, а їхня загальна довжина $L = 5\text{ м}$.

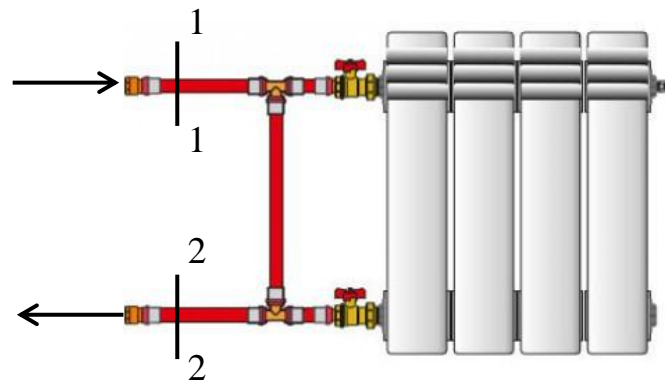


Рисунок 1.25 – Схема радіатора водяного опалення до задачі 3

Задача 4. Визначити початкову довжину ділянки (L_n) сталевого трубопроводу з діаметром $d = 0,2\text{ м}$. Витрата води $Q = 0,15\text{ м}^3/\text{с}$, температура $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Задача 5. Насос з витратою $Q = 0,01\text{ м}^3/\text{с}$ забирає воду з колодязя, який сполучається з водоймищем чавунною трубою $d = 150\text{ мм}$ завдовжки $L = 100\text{ м}$ (рис. 1.26). На вході у трубу стоїть сітка. Температура води у водоймищі – $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Знайти перепад рівнів води Δh у водоймі та колодязі.

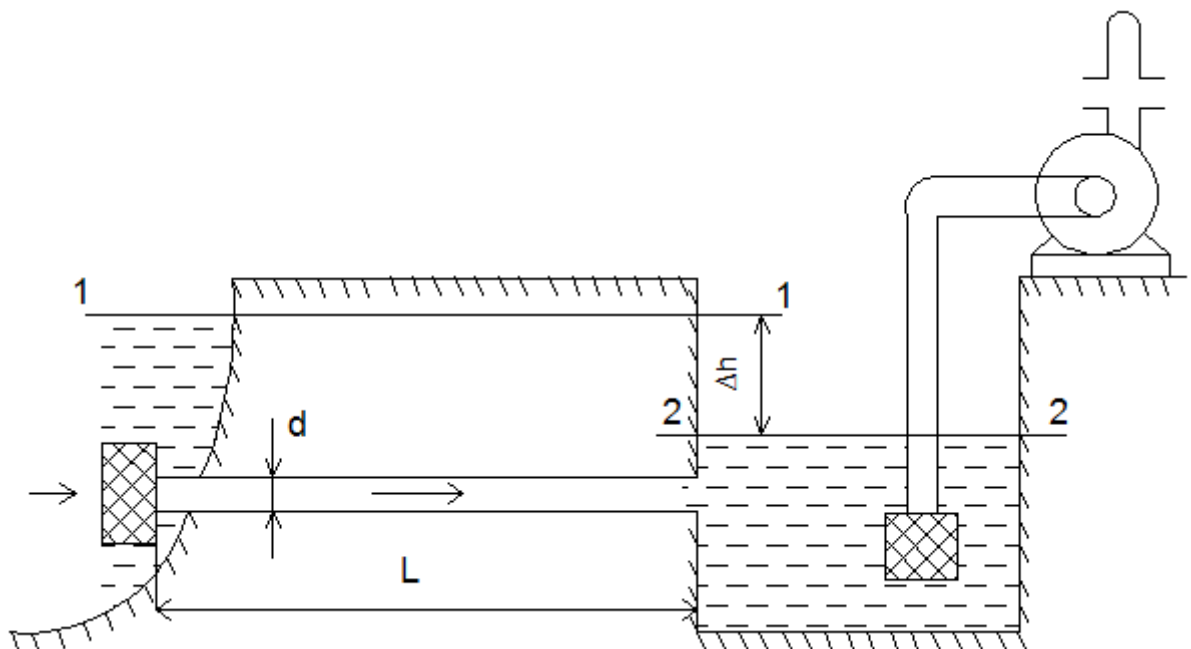


Рисунок 1.26 – Схема забору води з колодязя насосом до задачі 5

Задача 6. У трубі з діаметром 150 мм тече масло, кінематична в'язкість якого $\nu = 1,6\text{ см}^2/\text{с}$, а питома маса $\rho = 900\text{ кг}/\text{м}^3$. Витрати масла $Q = 30\text{ л}/\text{с}$.

Перевірити, чи режим руху ламінарний. Підрахувати максимальну швидкість течії і втрати тиску на одиницю довжини труби.

Задача 7. Похилою трубою з раптовим розширенням діаметра від $d_1 = 5$ см до $d_2 = 10$ см тече вода. Відмітки вільної поверхні у п'єзометричних трубках до розширення $(z_1 + P_1/\gamma) = 0,4$ м і після розширення – $(z_1 + P_1/\gamma) = 0,7$ м. Визначити витрату води.

Задача 8. По трубопроводу з постійним діаметром $d = 150$ мм і довжиною $L = 25$ м тече вода в кількості $Q = 40$ л/с і витікає в атмосферу. Визначити, під яким напором відбувається витікання.

Задача 9. При якому режимі буде текти вода з температурою 15 °С:

а) у круглій напірній трубі з діаметром $d = 250$ мм, якщо витрата $Q = 2$ л/с;

б) у відкритому прямокутному руслі при $Q = 1$ м³/с глибина $h = 0,8$ м та $b = 0,7$ м.

Задача 10. Визначити витрату води при $t = 5$ °С у трубі з діаметром 50 мм, при якому зміниться режим руху.

Задача 11. Чи зміниться режим руху потоку з витратою $Q = 0,042$ л/с у круглій трубі з діаметром 25 мм, якщо температура підвищиться з 5 °С до 45 °С?

Задача 12. Чи можлива зміна режиму руху від ламінарного до турбулентного, якщо рідина рухається з постійною витратою Q по конічному трубопроводу, який звужується?

Задача 13. Визначити максимальний діаметр трубопроводу, у якому нафта при $t = 15$ °С буде текти при ламінарному режимі з витратою $Q = 8$ л/с. Коефіцієнт кінематичної в'язкості нафти $\nu = 0,3$ см²/с.

Задача 14. Визначити критичну швидкість під час руху води і повітря по трубі з діаметром $d = 0,01$ м при температурі $t = 20$ °С. Коефіцієнт кінематичної в'язкості для води $\nu = 1 \cdot 10^{-6}$ м²/с, для повітря $\nu = 15,7 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

Задача 15. Визначити коефіцієнт вентиля, закріпленого наприкінці трубопроводу з діаметром $d = 50$ мм, якщо покази манометра перед вентилям $P_M = 3,7$ кПа, а витрата води $Q = 2,5$ л/с.

Запитання для самоперевірки

1. Який рух називають рівномірним?
2. Запишіть вираз для залежності λ від Re у випадку ламінарного руху.
3. Коротко опишіть механізм турбулентного руху.
4. Як записується рівняння Бернуллі для потоку в'язкої рідини?
5. Наведіть приклади практичного застосування рівняння Бернуллі.
6. Що таке ламінарний і турбулентний режим руху рідини?
7. Як залежать втрати енергії від швидкості при ламінарному і турбулентному русі?
8. Подайте основні формули для визначення гідравлічного коефіцієнта тертя в турбулентному режимі.
9. Як записуються формули Дарсі – Вейсбаха, Вейсбаха, Шезі?
10. Що таке місцевий опір? На що витрачається енергія потоку в ньому?
11. Як визначити місцеві втрати напору при раптовому розширенні та звуженні потоку?
12. Як експериментально визначити втрату опору?
13. Запишіть формулу Шезі для середньої швидкості та витрати при рівномірному русі.
14. Які формули для визначення коефіцієнта Шезі використовують у розрахунках?
15. Які значення чисел Рейнольдса характеризують межі областей опору при турбулентному русі у трубах промислового виготовлення?
16. Від яких факторів залежать значення коефіцієнтів місцевих опорів?
17. Поясніть поняття «коефіцієнт опору системи».

2 РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНЕ ЗАВДАННЯ

Розрахунково-графічне завдання передбачає розв'язання задачі щодо визначення сили тиску на плоску чи криволінійну поверхню.

Вихідні дані наведені нижче.

ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОГО ЗАВДАННЯ

Задача 1

Прямокутна ($b \cdot d$), квадратна ($d \cdot d$) або кругла ($\varphi \cdot d$) кришка люка закриває отвір в плоскій похилій стінці водойми (рис. 2.1).

Знайти силу тиску води на кришку, а також відстань до центру тиску u_d .

Щільність води – $1\,000\text{ кг/м}^3$.

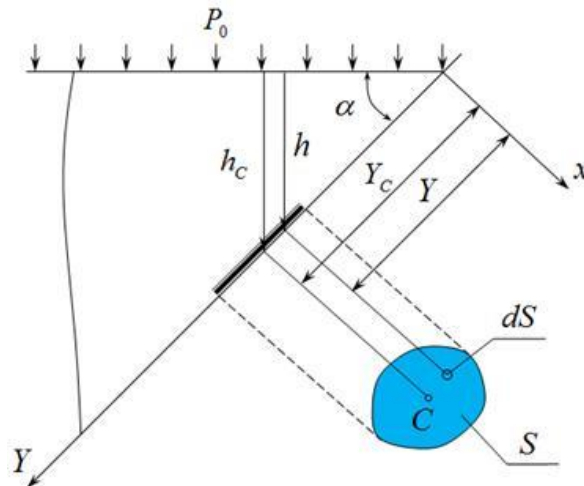


Рисунок 2.1 – Схема похилої стінки до задачі 1

Задача 2

Побудувати епюру гідростатичного тиску на бокову стінку резервуару (рис. 2.2). Визначити силу тиску води на затвор, який знаходиться на глибині H , м. Визначити центр тиску.

Вихідні дані:

- 1) для прямокутного затвору – $H = 2,5\text{ м}$, $h = 0,8\text{ м}$, $b = 0,4\text{ м}$;
- 2) для круглого затвору – $H = 3,7\text{ м}$, $d = 0,4\text{ м}$;
- 3) для квадратного затвору – $H = 1,7\text{ м}$, $a = 0,9\text{ м}$.

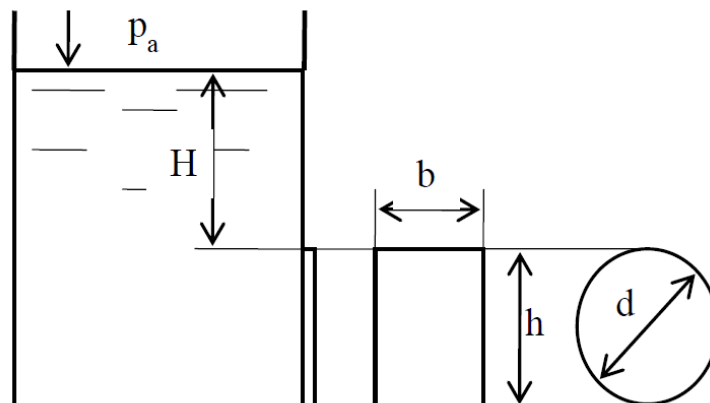


Рисунок 2.2 – Схема резервуара до задачі 2

Задача 3

Прямокутний резервуар розділений стінкою на два відсіки (рис. 2.3). Глибина води у першому відсіку $H_1 = 1,5$ м, у другому відсіку $H_2 = 0,9$ м, ширина резервуара $b = 1,2$ м. Визначити сили тиску P_1 та P_2 , які діють зліва та справа і точки їх прикладання, а також величину рівнодіючої цих сил і точку її прикладання.

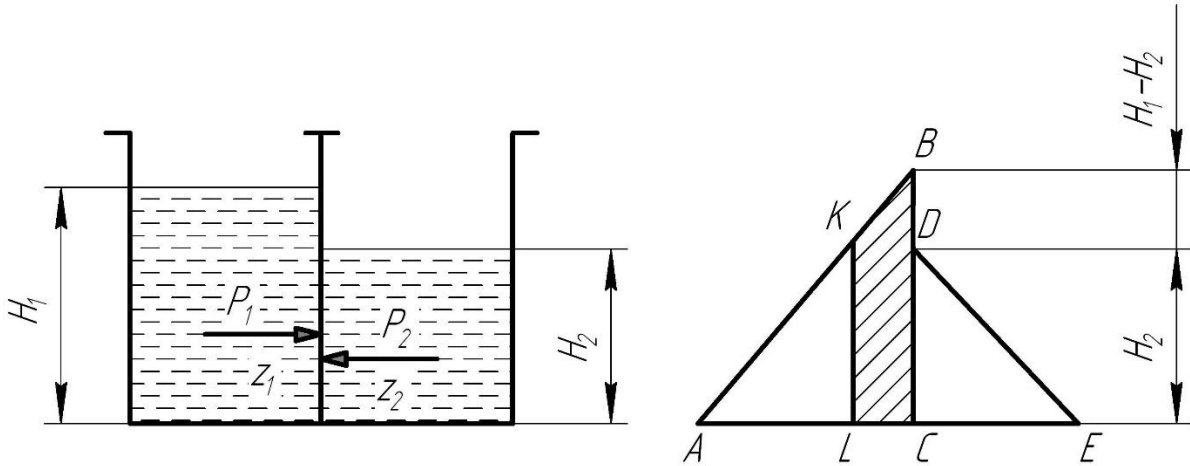


Рисунок 2.3 – Схема резервуара до задачі 3

Задача 4

Визначити зусилля P , яке діє на кришку, що закриває круглий люк діаметром $D = 500$ мм у посудині, наповненій рідиною, щільність якої $\rho = 1\,050$ кг/м³ і висотою рідини по центру люка $h = 2,2$ м, $P_0 = 0,7$ МПа (рис. 2.4).

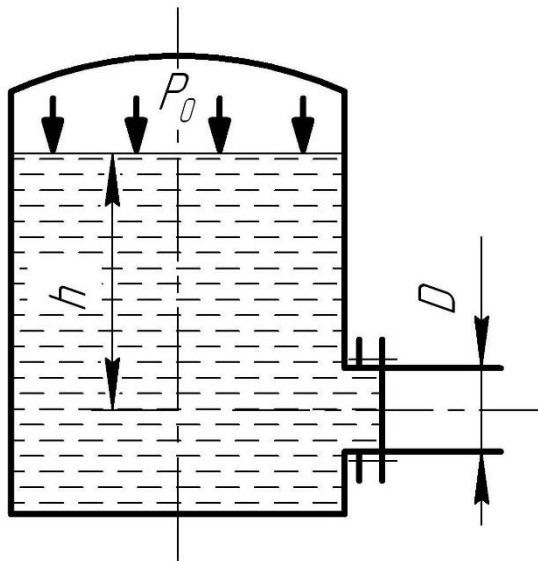


Рисунок 2.4 – Схема резервуара до задачі 4

Задача 5

Замкнутий резервуар з нафтою (рис. 2.5) розділений на два відсіки плоскою перегородкою. Тиск над нафтою у лівому відсіку надлишковий і дорівнює $p_M = 60$ кПа, а в правому відсіку вакуум $p_{\text{вак}} = 9,5$ кПа. Знайти силу тиску нафти на перегородку і точку прикладання (центр тиску) цієї сили. Рівень нафти в лівому відсіку $h_1 = 6$ м, різниця рівнів $h = 4$ м, ширина перегородки $b = 2,2$ м.

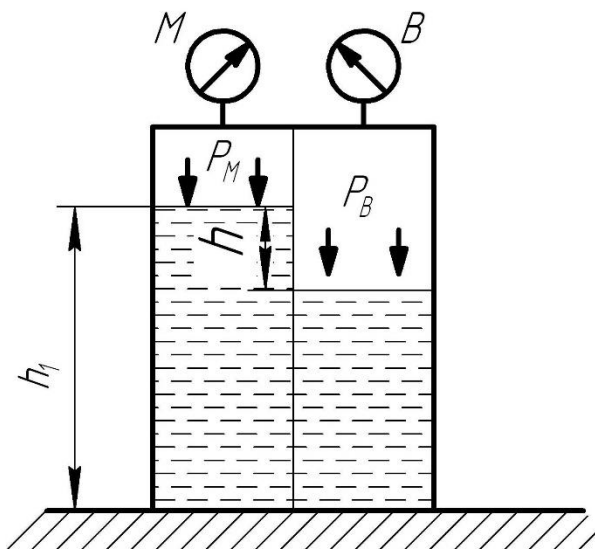


Рисунок 2.5 – Схема резервуара до задачі 5

Задача 6

Визначити силу P , яка відкриває кришку у вигляді напівциліндра, що закриває отвір розміром $d = 0,8$ м, у стінці, яка нахилена під кутом 45° до горизонту (рис. 2.6). Вільна поверхня води розташована на висоті $H = 4,1$ м над центром отвору.

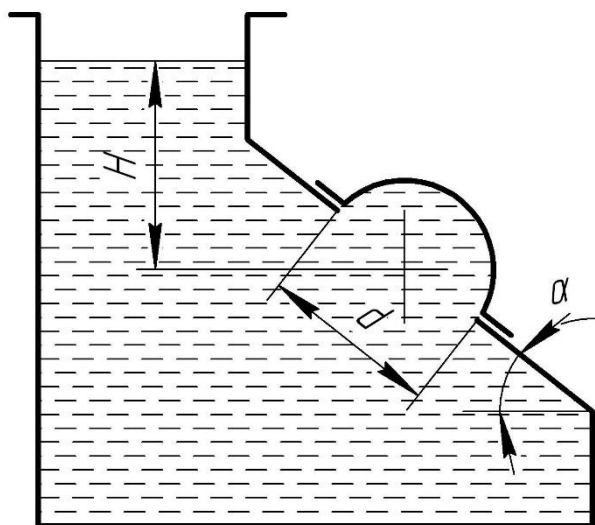


Рисунок 2.6 – Схема резервуара до задачі 6

Задача 7

Визначити горизонтальну та вертикальну складники сили тиску на циліндричну поверхню ABC (рис. 2.7). Вихідні дані: $H = 5,1$ м, $r = 1,4$ м, довжина утворюючої циліндра $L = 3,2$ м.

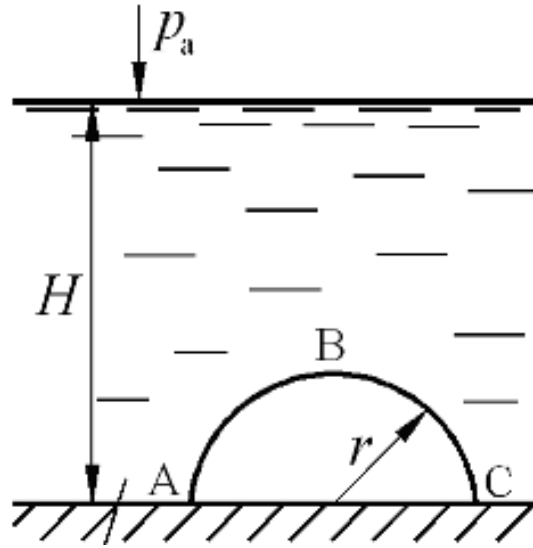


Рисунок 2.7 – Схема резервуара до задачі 7

Задача 8

Визначити силу тиску на циліндричну поверхню BCD (рис. 2.8), якщо глибина води $h = 2,1$ м; $H = 5,4$ м; довжина утворюючої циліндра $L = 2,2$ м.

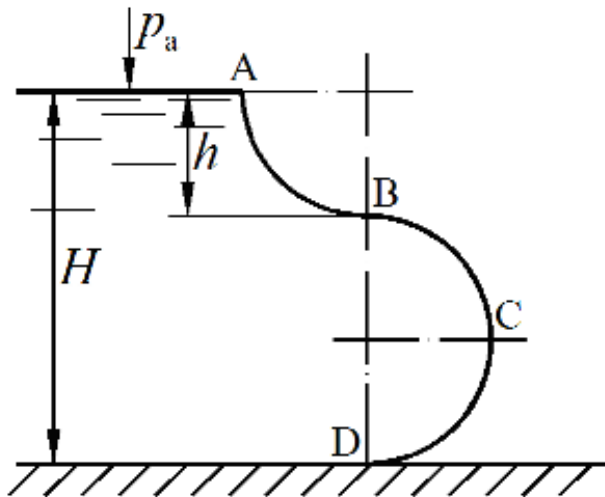


Рисунок 2.8 – Схема резервуара до задачі 8

Задача 9

Визначити силу тиску на поверхню BC (рис. 2.9), якщо $h = 1,7$ м; $r = 0,7$ м; довжина стінки $L = 1,8$ м.

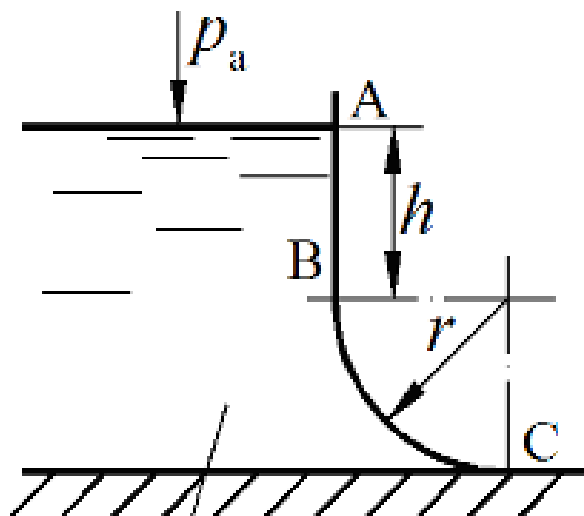


Рисунок 2.9 – Схема резервуара до задачі 9

Задача 10

Визначити силу гідростатичного тиску води на циліндричну поверхню (рис. 2.10). Визначити центр тиску.

Дано: $h_1 = 1$ м; $h_2 = 3$ м; $H = 6$ м; $L = 3$ м; $p_0^{\text{ман}} = 29,43$ кПа.

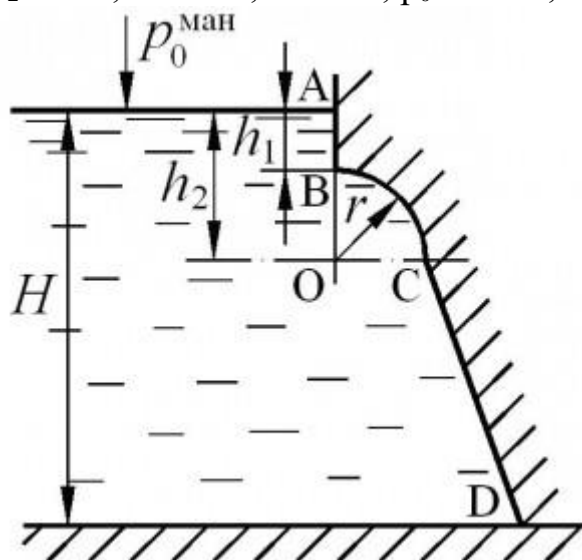


Рисунок 2.10 – Схема резервуара до задачі 10

Задача 11

Знайти силу і центр тиску на стінку АВ (рис. 2.11).

Знайти силу і центр тиску на стінку BCD.

Вихідні дані: $h = 2$ м; $r = 3$; $L = 1$ м.

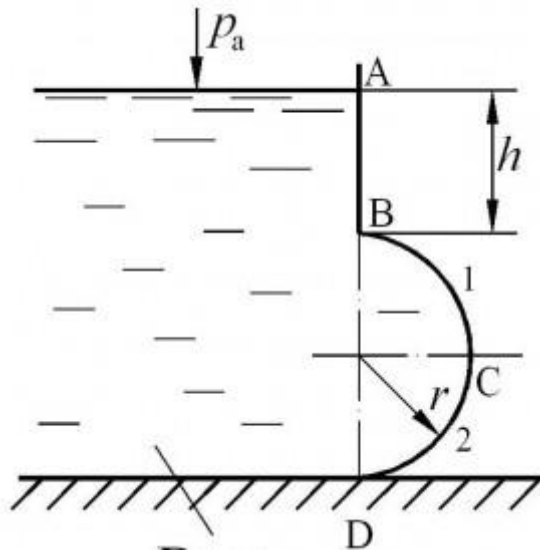


Рисунок 2.11 – Схема резервуара до задачі 11

Задача 12

Знайти силу і центр тиску на стінку BC (рис. 2.12).

Вихідні дані: ширина стінки $B = 1$ м; $H = 10$ м; $R = 3$ м.

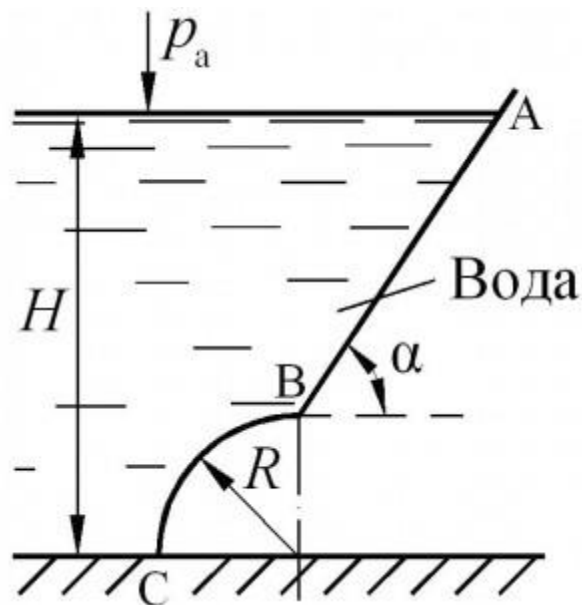


Рисунок 2.12 – Схема резервуара до задачі 12

Задача 13

Визначити горизонтальну та вертикальну складники сили тиску на циліндричну поверхню ABC (рис. 2.13).

Вихідні дані: $H = 1,2$ м; $r = 0,5$ м; довжина утворюючої циліндра $L = 1$ м.

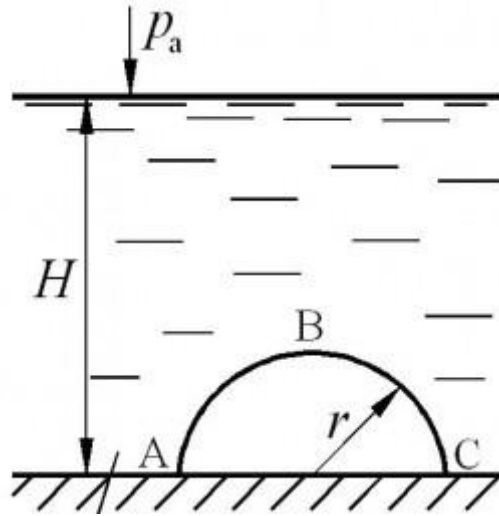


Рисунок 2.13 – Схема резервуара до задачі 13

Задача 14

Знайти силу і центр тиску на поверхню BC (рис. 2.14), якщо $H = 4$ м; $R = 1,5$ м; $L = 1$ м.

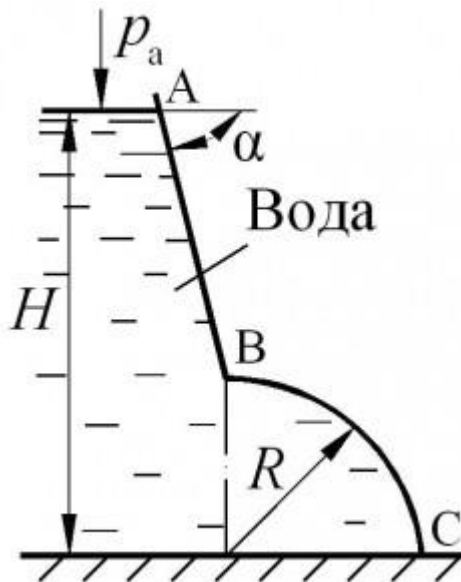


Рисунок 2.14 – Схема адо задачі 14

Задача 15

Визначити силу, яка діє на поверхню BCD (рис. 2.15) і центр тиску, якщо $h = 4$ м; $r = 2$ м; $L = 2$ м.

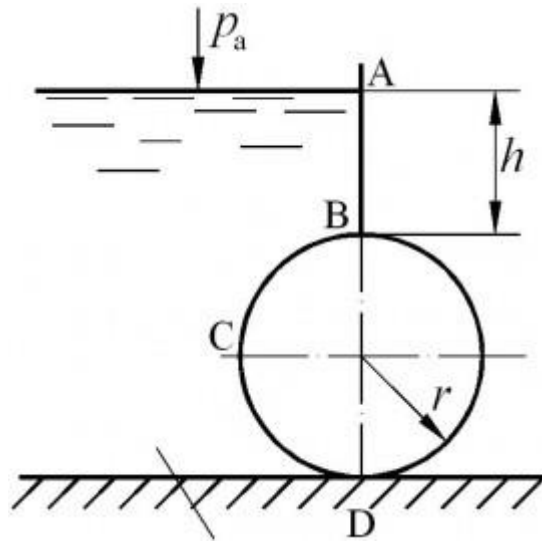


Рисунок 2.15 – Схема резервуара до задачі 15

Задача 16

Визначити силу гідростатичного тиску води на циліндричну поверхню АВ (рис. 2.16). Дано: $h_1 = 2$ м; $h_2 = 3$ м; $H = 8$ м; $b = 2$ м.

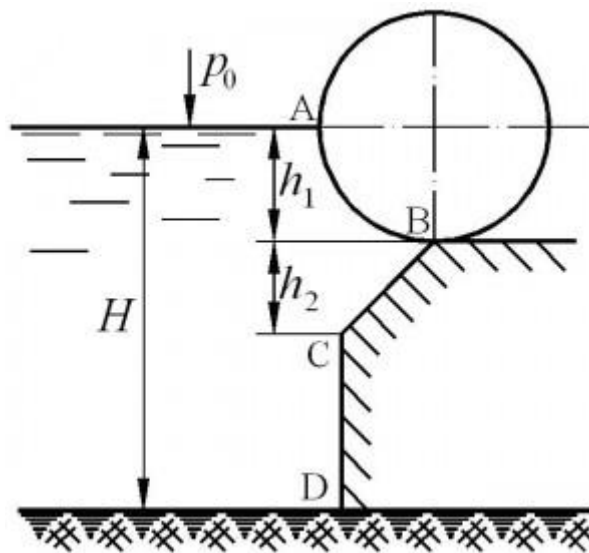


Рисунок 2.16 – Схема резервуара до задачі 16

Задача 17

Визначити силу гідростатичного тиску води на циліндричну поверхню BCD (рис. 2.17). Дано: $h_1 = 2$ м; $H = 6$ м; $L = 4$ м.

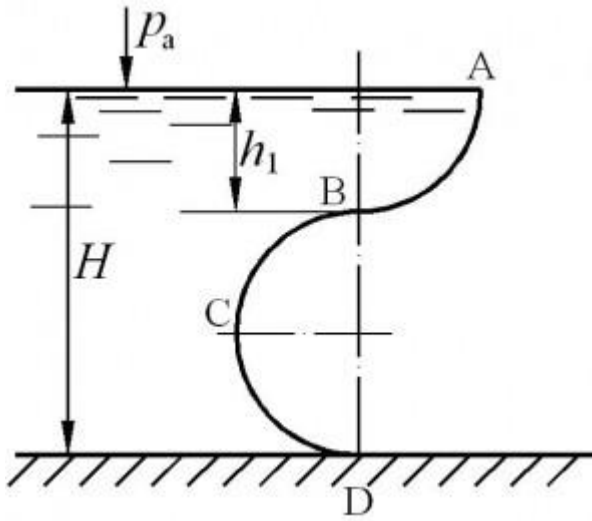


Рисунок 2.17 – Схема резервуара до задачі 17

Задача 18

Розрахувати величину повного гідростатичного тиску на контур ABCDE (рис. 2.18).

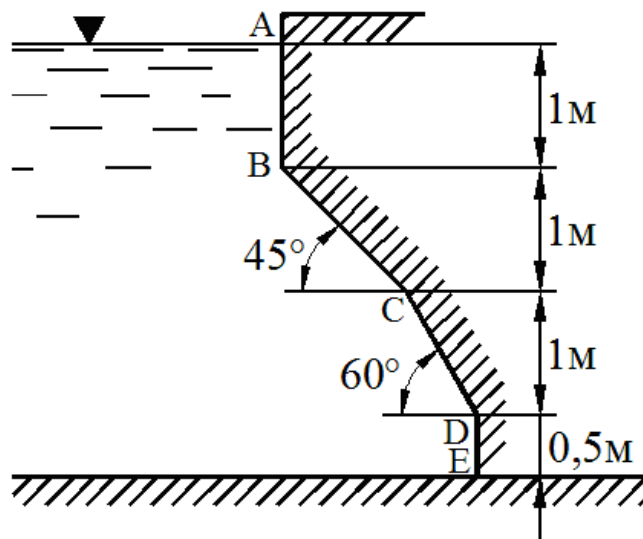


Рисунок 2.18 – Схема резервуара до задачі 18

Задача 19

Визначити силу гідростатичного тиску води на циліндричну поверхню CD (рис. 2.19), якщо глибини $h_1 = 2$ м; $h_2 = 6$ м; довжина утворюючої циліндра $L = 2$ м.

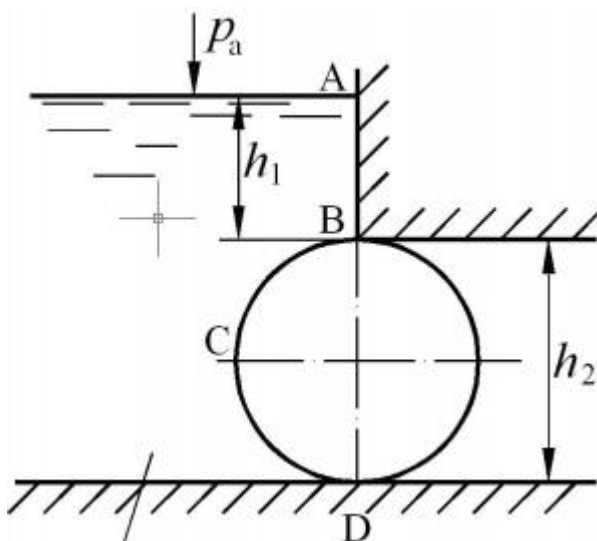


Рисунок 2.19 – Схема резервуара до задачі 19

Задача 20

Знайти силу і центр тиску на стінку АВ.

Знайти силу і центр тиску на стінку ВС.

Вихідні дані: ширина стінки $B = 1,5$ м; $H = 3$ м; $R = 0,5$ м; $\alpha = 30^\circ$;
 $p_0^{\text{ман}} = 32,24$ кПа.

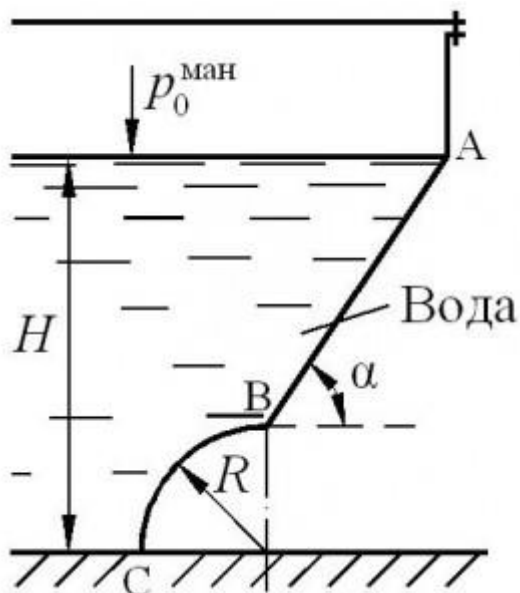


Рисунок 2.20 – Схема резервуара до задачі 20

Задача 21

Визначити силу тиску на напівсферу (рис. 2.21), якщо $r = 2$ м, $p_0^{\text{ман}} = 98,1$ кПа.

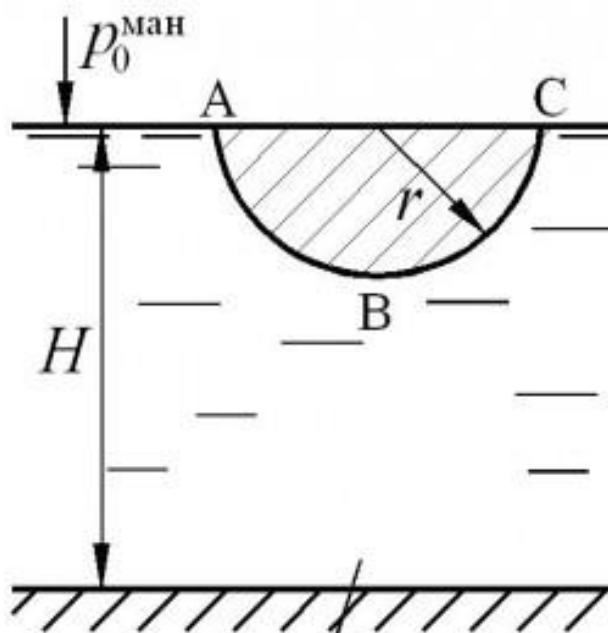


Рисунок 2.21 – Схема резервуара до задачі 21

Задача 22

Визначити силу гідростатичного тиску води на циліндричну поверхню ABC (рис. 2.22), якщо $h = 4$ м, $r = 2$ м, довжина утворюючої циліндра $L = 3$ м.

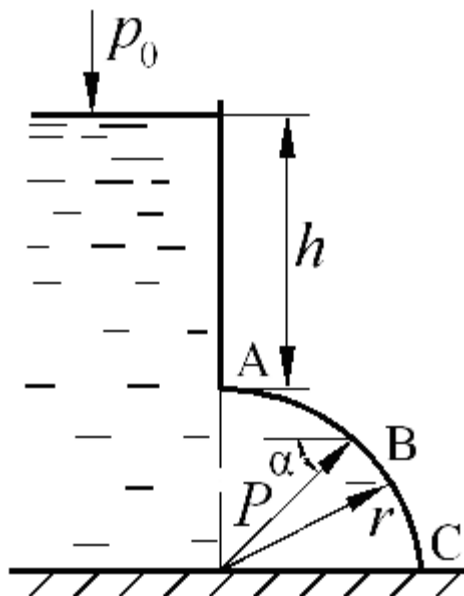


Рисунок 2.22 – Схема резервуара до задачі 22

3 САМОСТІЙНЕ ВИВЧЕННЯ ДИСЦИПЛІНИ

ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 1 ГІДРОСТАТИКА

Тема 1 Вступ. Технічна механіка рідини та газу як наука. Основні фізичні властивості рідин та газів

Вступ. Технічна механіка рідини та газу як наука. Короткий історичний огляд її розвитку. Значення «Технічної механіки рідини та газу» у народному господарстві. Визначення рідин та газів. Реальні та ідеальні рідини. Основні фізичні властивості рідин та газів: густина, стисливість, розширення, течійність, в'язкість. Розчинення газів у рідинах. Кипіння. Кавітація.

Питання для самоконтролю

1. Подайте визначення поняття «рідина». Якими фізичними властивостями вона володіє?
2. Наведіть визначення питомої маси та питомої ваги рідини. Як вони пов'язані?
3. Надайте характеристику таких фізичних властивостей рідини, як стиснення та температурне розширення.
4. Подайте визначення поняття «в'язкість». Як вона визначається?

Тема 2 Статика рідин та газів. Гідростатичний тиск. Основне рівняння гідростатики

Предмет статички рідин та газів. Сили, що діють на рідини і гази. Гідростатичний тиск та його властивості. Тензор напруження. Різновиди гідростатичного тиску. Диференційне рівняння спокою рідини (рівняння Ейлера).

Основне рівняння гідростатики. Геометрична та фізична його інтерпретація. Відносний спокій рідин та газів. Поверхні і лінії рівноваги тиску.

Питання для самоконтролю

1. Назвіть сили, які діють на рідину у стані спокою.
2. Подайте визначення поняття «гідростатичний тиск» та охарактеризуйте його властивості.
3. Наведіть алгоритм визначення диференційного рівняння рівноваги рідини.
4. Подайте визначення закону Паскаля Яким є його практичне застосування?
5. Перелічіть види тиску в рідині. Наведіть основні типи приладів для визначення тиску.
6. У чому полягає закон сполучених посудин? Його практичне застосування.
7. Подайте визначення поняття «гідростатичний напір» та «п'єзометричний напір».
8. Поясніть поняття «питома потенційна енергія рідини у стані спокою».

9. Наведіть методику отримання основного рівняння гідростатики.
10. У чому полягає фізична та геометрична інтерпретація основного рівняння гідростатики?
11. Наведіть основні види поверхонь та ліній рівноваги тиску.

Тема 3 Сила тиску рідин та газів на плоскі та криволінійні поверхні

Сила тиску рідин та газів на плоскі поверхні. Центр тиску та його координата. Епюри та призми гідростатичного тиску. Принцип дії простих гідравлічних машин.

Визначення сили тиску на криволінійні поверхні. Центр тиску на циліндричні поверхні.

Питання для самоконтролю

1. Подайте визначення епюри гідростатичного тиску. Наведіть епюри гідростатичного тиску у резервуарах з різними видами тиску.
2. Наведіть схему та алгоритм визначення сили тиску на плоскі стінки і дно резервуарів.
3. Наведіть схему та алгоритм визначення сили тиску на криволінійні стінки і дно резервуарів.

Тема 4 Закон Архімеда. Плавання тіл

Закон Архімеда. Основи теорії плавання тіл.

Питання для самоконтролю

1. Подайте визначення закону Архімеда.
2. Що таке остійність? Як вона впливає на плавання тіл?
3. Подайте визначення водотоннажності.
4. Що таке позитивне та негативне тіло тиску? Для визначення якої величини застосовують ці поняття?

ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 2 ГІДРОДИНАМІКА

Тема 5 Предмет гідродинаміки. Основи гідродинаміки

Предмет гідродинаміки. Складові гідродинаміки (кінематика, динаміка). Методи вивчення руху рідин та газів (Легранжа, Ейлера). Усталений та неусталений рух рідин і газів. Модель ідеальної (нев'язкої) рідини. Модель одномірних рідин і газів. Струминна модель. Елементи і параметри потоку: лінія течії, трубка течії, елементарний струмінь, потік, живий переріз, витрата, середня швидкість.

Рівняння нерозривності (суцільності) рідини і газу за одномірною моделлю.

Моделі руху частинок рідини. Диференціальні рівняння руху рідини (рівняння Нав'є – Стокса). Поняття про потенціальний рух рідин та потенційні потоки.

Диференціальні рівняння руху ідеальної рідини (рівняння Ейлера). Рівняння Бернуллі для нев'язкого та в'язкого елементарного струменя. Геометрична та фізична інтерпретація цього рівняння.

Питання для самоконтролю

1. Подайте визначення гідродинаміки та основних гідравлічних параметрів потоку рідини, яка рухається.
2. Назвіть основні елементи потоку, подайте їх визначення.
3. Наведіть алгоритм визначення рівняння нерозривності руху рідини для елементарного струменя і для потоку рідини.
4. Наведіть диференціальні рівняння руху ідеальної рідини. Що отримують в результаті інтегрування цих рівнянь?
5. Наведіть геометричну схему рівняння Бернуллі для елементарного струменя потоку та назвіть його основні складові.

Тема 6 Режими руху рідини

Режими руху рідини. Пульсація швидкостей і тисків у турбулентному потоці. Осереднені швидкості в точках живих перерізів турбулентного потоку. Миттєві швидкості і тиски. Число Рейнольдса. Критичне значення числа Рейнольдса. Фізичний зміст числа Рейнольдса.

Питання для самоконтролю

1. Які ви знаєте режими руху рідини? Як їх можна визначити?
2. Що таке критичні швидкості? Наведіть схему лабораторної установки для визначення режимів руху рідини.

Тема 7 Рівняння Бернуллі для потоку реальної рідини і газу

Гідравлічна та фізична інтерпретація цього рівняння.

Рівняння Бернуллі для потоку реальної рідини і газу. Гідравлічна та фізична інтерпретація цього рівняння. Поняття про п'єзометричний та гідравлічний ухили

Питання для самоконтролю

1. Наведіть геометричну схему рівняння Бернуллі потоку реальної рідини та назвіть його основні складники.
2. Подайте визначення п'єзометричного та гідравлічного ухилів. Наведіть формули для їх визначення.
3. Наведіть приклади практичного застосування рівняння Бернуллі. З якою послідовністю розв'язують задачі із застосування цього рівняння?

Тема 8 Гідравлічні опори. Втрати напору

Гідравлічні опори, їх фізична природа і класифікація. Втрати напору. Види втрат напору. Формула Дарсі – Вейсбаха. Модель турбулентного потоку у трубах. Пристінний ламінарний і турбулентний шар. Гідравлічно гладкі та гідравлічно шорсткі поверхні. Розподіл осереднених швидкостей і дотичних

напружень у живих перерізах турбулентних потоків. Турбулентні дотичні напруження.

Питання для самоконтролю

1. Охарактеризуйте причини виникнення гідравлічних опорів під час руху рідини. Подайте визначення та основні формули для визначення втрат напору за довжиною.

2. Від чого залежать місцеві гідравлічні опори? За якою формулою визначаються місцеві втрати напору?

3. Наведіть основні види місцевих опорів та величину відповідного коефіцієнта місцевого опору.

4. Як впливає в'язкість рідини за малих чисел Рейнольдса на визначення коефіцієнта місцевого опору?

Тема 9 Експериментальні дослідження гідравлічного коефіцієнта тертя.

Втрати за довжиною при турбулентному русі рідини

Експериментальні дослідження гідравлічного коефіцієнта тертя. Дослідження гідравлічного коефіцієнта тертя у трубах з неоднорідною технічною шорсткістю.

Питання для самоконтролю

1. Наведіть схему лабораторної установки для визначення коефіцієнта гідравлічного тертя.

2. Як впливає на величину коефіцієнта гідравлічного тертя внутрішня шорсткість трубопроводів?

3. Наведіть формули для визначення коефіцієнта гідравлічного тертя у разі наявності ламінарного руху. Від чого в цьому разі залежить величина цього коефіцієнта?

4. Наведіть формули для визначення коефіцієнта гідравлічного тертя у разі наявності турбулентного руху. Від чого в цьому разі залежить величина зазначеного коефіцієнта?

Тема 10 Місцеві опори та втрати напору

Визначення коефіцієнтів місцевих втрат для різних типів місцевих опорів у гідравлічних системах.

Питання для самоконтролю

1. Від чого залежать місцеві гідравлічні опори? За якою формулою визначаються місцеві втрати напору?

2. Наведіть основні види місцевих опорів та величину відповідного коефіцієнта місцевого опору.

3. Як впливає в'язкість рідини за малих чисел Рейнольдса на визначення коефіцієнта місцевого опору?

ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 3

ВИДИ РУХУ РІДИН ТА ГАЗІВ У НАПІРНИХ ТА БЕЗНАПІРНИХ СИСТЕМАХ

Тема 11 Розрахунок трубопровідних систем

Усталений рух рідини і газу в напірних трубопроводах. Класифікація трубопроводів та їх з'єднань. Поняття короткого, довгого трубопроводу. Основні залежності для розрахування коротких трубопроводів. Приклади розрахунків. Коефіцієнт гідравлічного опору і витрати системи.

Питання для самоконтролю

1. Подайте визначення та назвіть основне призначення магістральних і розгалужених мережі труб.
2. Наведіть класифікацію трубопроводів залежно від матеріалу труб і від різновиду роздачі рідини.
3. Назвіть типи задач для гідравлічного розрахунку трубопроводів.
4. Наведіть основні розрахункові формули для руху рідини в напірних трубопроводах
5. У чому полягає розрахунок простого трубопроводу? Наведіть типи задач для його розрахунку.
6. Подайте визначення питомого опору й опору ділянки трубопроводу.
7. У чому полягає розрахунок самопливного, сифонного трубопроводів та всмоктувального трубопроводу насоса?
8. Яке поєднання трубопроводів називається послідовним?
9. Яке поєднання трубопроводів називається паралельним?
10. Подайте визначення вузлової, шляхової, транзитної та розрахункової витрат.
11. Наведіть визначення та послідовність розрахунку дірчастого трубопроводу.
12. У чому полягає економічний розрахунок трубопроводу? Що таке найвигідніший діаметр?

Тема 12 Гідравлічний розрахунок водопровідних мереж

Основні залежності для розрахунків довгих трубопроводів з перемінними витратами (масою рідини і газу) уздовж трубопроводу. Розподільні трубопроводи. Трубопроводи-збирачі.

Розімкнуті (тупикові) водопровідні мережі. Принцип розрахунку кільцевих водопровідних мереж.

Питання для самоконтролю

1. Наведіть алгоритм розрахунку розімкненої мережі водопроводу.
2. Наведіть алгоритм розрахунку кільцевої мережі.
3. Де може бути розташована водонапірна башта в мережі водопостачання?

4. Як визначити витрати води в години максимального водоспоживання в задачі про два резервуари?

5. Як визначити витрати води в години мінімального водоспоживання в задачі про два резервуари.

6. Як визначити витрати води в години максимального водоспоживання в задачі про три резервуари?

7. Як визначити витрати води в години мінімального водоспоживання в задачі про три резервуари?

Тема 13 Гідравлічний удар в трубопроводах

Гідравлічний удар в трубопроводах. Коливання тиску. Формула М. Є. Жуковського. Повний та неповний гідравлічний удар. Заходи попередження гідравлічного удару. Гідравлічний таран.

Питання для самоконтролю

1. Що таке гідравлічний удар?
2. Назвіть причини виникнення гідравлічного удару.
3. Подайте визначення позитивного і негативного гідравлічного удару.
4. У чому полягає теорія гідравлічного удару Жуковського?
5. Що таке фаза ударної хвилі?
6. Що таке прямий і непрямий гідравлічний удар?
7. Як визначити максимальне підвищення тиску при прямому і непрямому ударах?
8. Назвіть заходи з локалізації явища гідравлічного удару у водопровідних трубах і на насосних станціях.
9. У чому полягає дія гідравлічного тарану?

Тема 14 Рух рідини і газу через отвори і насадки

Усталений рух рідини і газу через отвори і насадки. Використання отворів і насадок в технічних системах і механізмах. Поняття малого та великого отвору. Пропускна здатність отворів при витіканні рідини в газове середовище. Пропускна здатність отворів при витіканні рідини в рідину. Коефіцієнти стиснення, швидкості і витрати.

Класифікація насадок. Пропускна здатність насадок при витіканні рідини в газове середовище та рідини в рідину. Вакуум в насадках. Коефіцієнти швидкості і витрати.

Неусталений рух рідини в напірних системах. Витікання із отворів, насадок і коротких труб при змінних напорах. Витікання в атмосферу при наявності припливу рідини. Витікання рідини в рідину при змінних напорах.

Питання для самоконтролю

1. Наведіть класифікацію отворів.
2. Подайте визначення явища інверсії. Що таке досконале і недосконале стиснення?

3. Наведіть схеми та надайте до них пояснення щодо вільного, підтопленого та затопленого отворів.

4. Наведіть схему витікання рідини з малих отворів при постійному напорі.

5. Наведіть схему витікання рідини з великих отворів при постійному рівні рідини в резервуарі.

6. Наведіть схему витікання рідини з отворів при змінному напорі.

7. Подайте класифікацію насадок, назвіть сфери їх використання.

8. Подайте визначення поняття «вільний струмінь».

9. Наведіть частини, з яких складається незатоплений струмінь.

10. Як визначити висоту вертикального струменя?

11. Наведіть схему граничної кривої розповсюдження струменя.

12. Наведіть схему руху рідини в затопленому струмені.

Завданням на контрольну роботу передбачається складання відповідей на контрольні питання, номери яких вказані в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Варіанти контрольних запитань

Номер розділу	Номери варіантів (остання цифра номера залікової книжки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
1	1	3	2	4	–	–	–	–	–	–
2	–	–	–	–	8, 2	6, 7	2, 5	4, 10	3, 9	1, 11
3	1	2	3	–	–	–	–	–	–	–
4	–	–	–	1	2	4	3	–	–	–
5	–	–	–	–	–	–	–	1	2, 5	3, 4
6	1	2	–	–	–	–	–	–	–	–
7	–	–	1	2	3	–	–	–	–	–
8	–	–	–	–	–	4	3	2	1	–
9	3	2	1	–	–	–	–	–	–	4
10	–	–	–	1	3	2	–	–	–	–
11	–	–	–	–	–	–	1, 10	2, 8	3, 9	4, 12
12	3, 7	5, 6	1	2	–	–	–	–	–	–
13	–	–	–	–	1, 9	2, 7	3, 6	4, 5	–	–
14	–	–	–	–	–	–	–	–	2, 12	8, 10

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Константинов Ю. М. Технічна механіка рідини і газу / Ю. М. Константинов, О. О. Гіжа. – Київ : Вища школа, 2002. – 358 с.
2. Науменко І. І. Технічна механіка рідини і газу / І. І. Науменко. – Рівне : Видавництво РДТУ, 2000. – 528 с.
3. Науменко І. І. Гідравліка. Підручник / І. І. Науменко. – Рівне : НУВГП, 2005. – 475 с.
4. Луценко В. В. Технічна механіка рідини і газу [Електрон. ресурс] : навч. посіб. / В. В. Луценко. – Електрон. текст. дані. – Рівне : НУВГП, 2008. – 127 с. – Режим доступу: <http://ep3.nuwm.edu.ua/5602/>, вільний (дата звернення: 12.04.2024). – Назва з екрана.
5. Луценко В. В. Технічна механіка рідини і газу в тестах і задачах [Електрон. ресурс] : навч. посіб. / В. В. Луценко. – Електрон. текст. дані. – Рівне : НУВГП, 2015. – 194 с. – Режим доступу: <http://ep3.nuwm.edu.ua/4033/>, вільний (дата звернення: 10.05.2024). – Назва з екрана.
6. Hydraulics. Hydraulics machines / E. Krasowski, I. Nikolenko, J. Gliński, A. Dashchenko S. Sosnowski. – Lublin : Polish Academy of Sciences Branch in Lublin, 2011. – 350 p.
7. Іванчук Я. В. Гідравліка, гідро- та пневмоприводи. Частина 1. Основні закони, рівняння і визначення [Електрон. ресурс] : навч. посіб. / Я. В. Іванчук, Р. Д. Іскович-Лотоцький. – Електрон. текст. дані. – Вінниця : ВНТУ, 2019. – 183 с. – Режим доступу: http://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/IRVC/Ivanchuk_P1_2019_183.pdf, вільний (дата звернення: 12.06.2024). – Назва з екрана.
8. Альтман Е. І. Гідравліка : навч. посіб. / Е. І. Альтман, І. Л. Бошкова. – Одеса : ФОП Бондаренко М.О., 2020. – 210 с.
9. Константинов Ю. М. Задачник з гідравліки : навч. посіб. / Ю. М. Константинов, О. О. Гіжа. – Київ : КНУБА, 2008. – 92 с.

ДОДАТОК А

Таблиця А.1 – Залежність щільності води від температури

Температура, °С	Щільність, кг/м ³	Температура, °С	Щільність, кг/м ³	Температура, °С	Щільність, кг/м ³
-10	998,15	7	999,93	25	997,07
-9	998,43	8	999,88	26	996,81
-8	998,69	10	999,73	27	996,52
-7	998,92	11	999,63	28	996,22
-6	999,12	12	999,52	29	995,92
-5	999,30	13	999,40	30	995,61
-4	999,45	14	999,27	31	995,21
-3	999,58	15	999,13	32	994,79
-2	999,70	16	998,97	33	994,36
-1	999,79	17	998,80	34	993,94
0	999,87	18	998,62	35	993,50
1	999,93	19	998,43	40	991,18
2	999,97	20	998,23	50	988,04
3	999,99	21	998,02	60	983,18
4	1000,0	22	997,80	70	977,71
5	999,99	23	997,57	80	972,69
6	999,97	24	997,32	90	965,34

ДОДАТОК Б

Таблиця Б.1 – Щільність крапельних рідин ρ (при температурі 20 °С)

№ з/п	Рідина	ρ , кг/м ³	№ з/п	Рідина	ρ , кг/м ³
1	Анілін	945	9	Масло мінеральне	877–892
2	Бензол	876–880	10	Нафта	760–900
3	Бензин авіаційний	739–780	11	Ртуть	13 550
4	Бітум рідкий	1 050	12	Спирт етиловий	790
5	Вода прісна	998,2	13	Хлористий натрій (26%-вий розчин)	1 100
6	Вода морська	1 002–1 030	14	Штукатурні розчини	2 000–2 500
7	Масло касторове	970	15	Ефір етиловий	715–719
8	Масло льняне	930			

ДОДАТОК В

Таблиця В.1 – Значення коефіцієнта об'ємного стиснення для деяких рідин

Рідина	Коефіцієнт об'ємного стиснення, β_p , $\text{см}^2/\text{Н}$	Рідина	Коефіцієнт об'ємного стиснення, β_p , $\text{см}^2/\text{Н}$
Вода	0,000 005 25–0,000 004 75	Гліцерин	0,000 002 5
Алкоголь	0,000 007 7	Газ	0,000 005 9
Ефір	0,000 001 0	Нафта	0,000 007 4
Ртуть	0,000 000 3	Дизельне паливо	0,000 006 4
Бензин	0,000 009 2		

Таблиця В.2 – Коефіцієнт об'ємного розширення деяких рідин

Рідина	β_t , $1/^\circ\text{C}$	Рідина	β_t , $1/^\circ\text{C}$
Вода	0,000 15	Нафта	0,000 6
Гліцерин	0,000 5	Ртуть	0,000 18
Спирт	0,001 1	Масло АМГ-10	0,000 8

Таблиця В.3 – Значення коефіцієнта об'ємного стиснення води, β_p , $\text{см}^2/\text{Н}$

Температура, $^\circ\text{C}$	Тиск, p , $\text{Н}/\text{см}^2$				
	50	100	200	390	780
0	0,000 005 4	0,000 005 37	0,000 005 31	0,000 005 23	0,000 005 15
5	0,000 005 29	0,000 005 23	0,000 005 18	0,000 005 08	0,000 004 93
10	0,000 005 23	0,000 005 18	0,000 005 08	0,000 004 98	0,000 004 81
15	0,000 005 18	0,000 005 1	0,000 005 03	0,000 004 88	0,000 004 7
20	0,000 005 15	0,000 005 05	0,000 004 95	0,000 004 81	0,000 004 6

Таблиця В.4 – Значення модуля пружності води, E , $\text{Н}/\text{см}^2$

Температура, $^\circ\text{C}$	Тиск, p , $\text{Н}/\text{см}^2$				
	50	100	200	390	780
0	185 400	186 400	188 400	191 300	197 200
5	189 300	191 300	193 300	197 200	203 100
10	191 300	193 300	197 200	201 100	208 000
15	193 300	196 200	199 100	205 000	212 900
20	194 200	198 200	202 100	208 000	217 800

Таблиця В.5 – Значення коефіцієнта температурного розширення води, β_t , $1/^\circ\text{C}$

Тиск, p , $\text{Н}/\text{см}^2$	Температура, t , $^\circ\text{C}$				
	1–10	10–20	40–50	60–70	99–100
10	0,000 014	0,000 15	0,000 422	0,000 556	0,000 719
980	0,000 043	0,000 165	0,000 422	0,000 548	0,000 714
1960	0,000 072	0,000 183	0,000 426	0,000 539	–
4900	0,000 149	0,000 236	0,000 429	0,000 523	0,000 661
8830	0,000 229	0,000 289	0,000 437	0,000 514	0,000 661

Примітка. Середнє значення коефіцієнта температурного розширення води $\beta_t = 0,000 208 1/^\circ\text{C}$.

ДОДАТОК Г

Таблиця Г.1 – Кінематична в'язкість деяких рідин (при температурі 20 °С)

Рідина	$\nu \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$	Рідина	$\nu \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$
Бензин	0,83–0,93	Масло льняне	55
Вода прісна	1,01	Масло мінеральне	313–1 450
Гліцерин безводний	4,1	Ртуть	0,11
Дизельне пальне	5,0	Нафта	8,1–9,3
Гас	2–3	Ртуть	0,11
Фарбові розчини (готові до використання)	90–120	Спирт етиловий безводний	1,51
Масло касторове	1002	Хлористий натрій (26 %-вий розчин)	1,53

Таблиця Г.2 – Кінематична в'язкість прісної води

Температура, °С	Коефіцієнт кінематичної в'язкості, $\nu, \times 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$	Температура, °С	Коефіцієнт кінематичної в'язкості, $\nu, \times 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$
0	0,017 9	25	0,009 0
1	0,017 3	30	0,008 0
2	0,016 7	35	0,007 2
3	0,016 2	40	0,006 5
4	0,015 7	45	0,006 0
5	0,015 2	50	0,005 5
7	0,014 3	60	0,004 8
10	0,013 1	70	0,004 2
12	0,012 4	80	0,003 7
15	0,011 4	90	0,003 3
17	0,010 9	100	0,002 9
20	0,010 1		

ДОДАТОК Д

Таблиця Д.1 – Щільність і кінематична в'язкість деяких газів (р = 100 кПа)

Газ	Температура t °С	Щільність $\rho, \text{ кг}/\text{м}^3$	Кінематична в'язкість $\nu \times 10^6 \text{ м}^2/\text{с}$
Повітря	15	1,21	14,5
Водень	15	0,085	94,5
Кисень	15	1,34	1,4
Вуглекислий газ	15	1,84	7,2

ДОДАТОК Е

Таблиця Е.1 – Поверхнєве натяжіння рідин (при температурі 20 °С)

Рідина	σ , Н/м	Рідина	σ , Н/м
Бензол	0,029	Нафта	0,025
Вода	0,073	Ртуть	0,49
Гліцерин	0,065	Спирт	0,022 5
Мильна вода	0,04		

ДОДАТОК Ж

Таблиця Ж.1 – Основні співвідношення одиниць вимірювання тиску

Найменування	кг/см ²	н/м ²
Фізична атмосфера	1,033	101 324
Технічна атмосфера	1,0	98 066,5
Міліметр ртутного стовпчика	0,001 36	133,32
Міліметр водяного стовпа	0,000 1	9,806 65

При практичних розрахунках приймають:

$$1 \text{ технічна атмосфера} = 1 \text{ кг/см}^2 = 9,81 \text{ н/см}^2.$$

ДОДАТОК И

Таблиця И.1 – Питома вага деяких рідин γ при 293 °К (20 °С)

Назва	кг/м ³	н/м ³
Вода прісна	998,2	9 789
Вода морська	1 020	10 020
Ртуть	13 547	132 850
Спирт етиловий безводний	789,3	7 740
Нафта важка	928,0	9 100
Бензин автомобільний	736	7 218
Солярка	846	8 287
Гліцерин	1 250	12 260

ДОДАТОК К

Таблиця К.1 – Тиск насичених парів води залежно від температури

Температура води, °С	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50
Тиск парів, Па	50,5	125,6	279,6	612	1 179	2 335	4 240	7 360	12 320

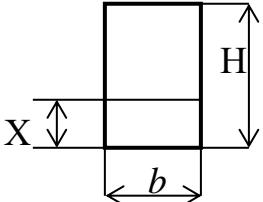
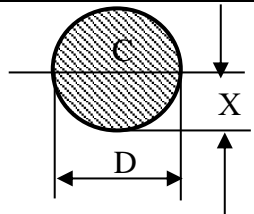
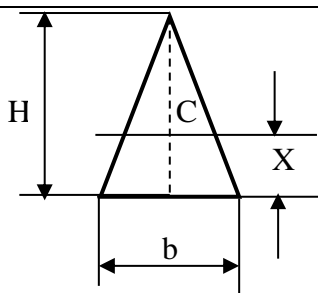
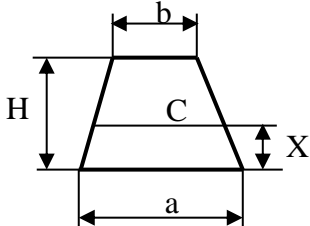
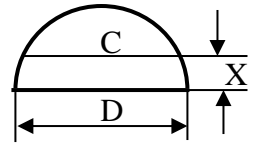
ДОДАТОК Л

Таблиця Л.1 – Залежність атмосферного тиску від висоти розташування місцевості

Висота над рівнем моря, м	0	100	200	300	400	500	600	800	1 000	1 500	2 000
Атмосферний тиск, кПа	101	100	99	97,5	96,5	95	94	92	90	84,5	80

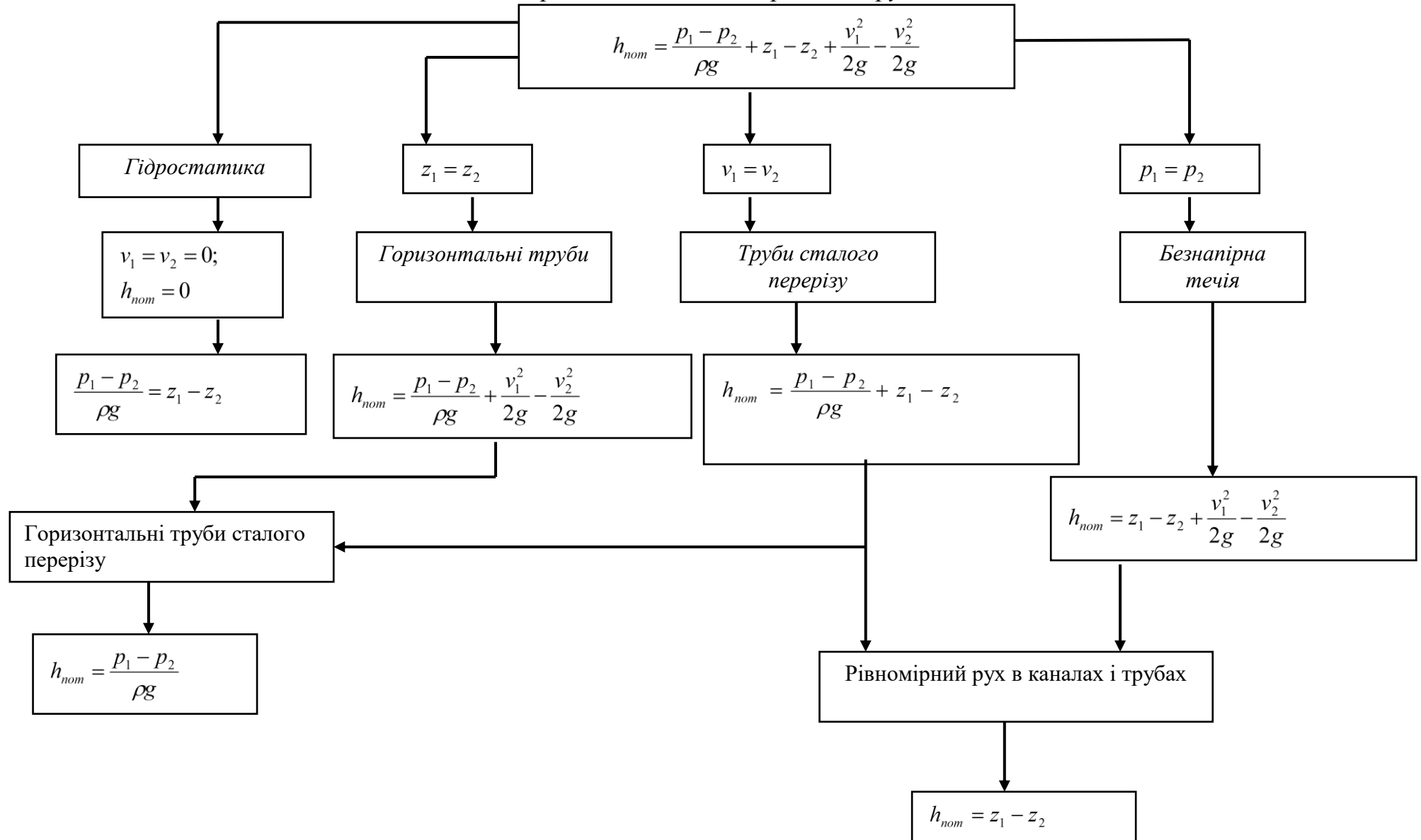
ДОДАТОК М

Таблиця М.1 – Розташування центра ваги плоских фігур і формули моментів інерції відносно осі, яка проходить через центр ваги

	$x = \frac{H}{2} \quad I_o = \frac{bH^3}{12}$
	$x = \frac{D}{2} \quad I_o = \frac{\pi D^4}{64} = \frac{D^4}{20,4}$
	$x = \frac{H}{3}; \quad I_o = \frac{bH^3}{36}$
	$x = \frac{H}{3}; \quad \frac{2b+a}{a+b}$ $I_o = \frac{H^3(a^2 + 4ab + b^2)}{36(a+b)}$
	$x = 0,424; \quad r = \frac{D}{4,71};$ $I_o = \frac{D^4 145,4}{4,71^3}$

ДОДАТОК Н

Алгоритм визначення втрат напору



ДОДАТОК П

Таблиця П.1 – Зв'язок між коефіцієнтом гідравлічного тертя λ і коефіцієнтом Шезі C

$C, m^{1/2}/c$	λ	$C, m^{1/2}/c$	λ	$C, m^{1/2}/c$	λ
10	0,785	35	0,064	60	0,022
15	0,345	40	0,049	70	0,016
20	0,196	45	0,039	80	0,012
25	0,125	50	0,031	90	0,010
30	0,087	55	0,026	100	0,008

ДОДАТОК Р

Таблиця Р.1 – Значення коефіцієнта гідравлічного тертя λ при русі повітря в нових трубах з покрівельної сталі (за Є. К. Громцевим)

Діаметр труб d , мм	Коефіцієнт λ при швидкості потоку повітря v , м/с						
	10	15	20	25	30	35	40
100	0,020 4	0,018 7	0,017 7	0,017 0	0,016 4	0,015 9	0,015 6
110	0,020 0	0,018 3	0,017 3	0,016 5	0,016 0	0,015 5	0,015 2
120	0,019 5	0,017 9	0,017 9	0,016 2	0,015 7	0,015 3	0,014 9
130	0,019 2	0,017 6	0,016 5	0,015 9	0,015 4	0,014 9	0,014 6
140	0,018 8	0,017 2	0,016 3	0,015 5	0,015 0	0,014 6	0,014 3
150	0,018 5	0,017 0	0,016 0	0,015 3	0,014 8	0,014 4	0,014 0
160	0,018 2	0,016 6	0,015 7	0,015 0	0,014 5	0,014 2	0,013 8
170	0,018 0	0,016 5	0,015 5	0,014 8	0,014 3	0,014 0	0,013 7
180	0,017 7	0,016 2	0,015 3	0,014 6	0,014 1	0,013 8	0,013 5
190	0,017 5	0,016 1	0,015 1	0,014 5	0,014 0	0,013 6	0,013 3
200	0,017 2	0,016 2	0,014 9	0,014 3	0,013 8	0,013 4	0,013 1
210	0,017 0	0,015 7	0,014 8	0,014 1	0,013 7	0,013 3	0,013 0
220	0,016 8	0,015 4	0,014 5	0,013 9	0,013 5	0,013 1	0,012 8
230	0,016 6	0,015 2	0,014 4	0,013 8	0,013 3	0,013 0	0,012 7
240	0,016 4	0,015 1	0,014 2	0,013 6	0,013 2	0,012 8	0,012 5
250	0,016 3	0,014 9	0,014 1	0,013 5	0,013 1	0,012 7	0,012 4
260	0,016 2	0,014 8	0,014 0	0,013 4	0,013 0	0,012 6	0,012 3

ДОДАТОК С

Таблиця С.1 – Значення коефіцієнта гідравлічного тертя λ , розраховані за формулою $\lambda = 0,021/d^{0,3}$

d, м	λ	d, м	λ	d, м	λ
1	0,021 0	1,75	0,017 8	3	0,015 1
1,25	0,019 6	2	0,017 1	4	0,013 9
1,5	0,018 6	2,5	0,016 1	5	0,011 6

ДОДАТОК Т

Таблиця Т.1 – Значення коефіцієнта форми А та еквівалентного діаметра трубопроводів

Форма живого перерізу	$d_{\text{екв}}$	A
Коло діаметром d .	d	64
Квадрат зі стороною a .	a	57
Рівносторонній трикутник зі стороною a .	$0,58a$	53
Кільцевий простір шириною a .	$2a$	96
Прямокутник зі сторонами a та b :		
– $a/b \approx 0$;	$2a$	96
– $a/b = 0,25$;	$1,6a$	73
– $a/b = 0,5$	$1,3a$	62

Електронне навчальне видання

Методичні рекомендації
для проведення практичних та лабораторних занять, виконання
розрахунково-графічного завдання та самостійної роботи
з навчальної дисципліни

«ТЕХНІЧНА МЕХАНІКА РІДИНИ ТА ГАЗУ»

(для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання зі спеціальностей 192 – Будівництво та цивільна інженерія, 194 – Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології)

Укладач **ШЕВЧЕНКО** Тамара Олександрівна

Відповідальний за випуск *Г. І. Благодарна*

Редактор *О. А. Норик*

Комп'ютерне верстання *Т. О. Шевченко*

План 2023, поз. 466М

Підп. до друку 27.06.2024. Формат 60 × 84/16.

Ум. друк. арк. 4.0.

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Маршала Бажанова 17, Харків, 61002.

Електронна адреса: office@kname.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 5328 від 11.04.2017.