



Міністерство освіти і науки України
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет енергетики, роботехніки та комп'ютерних технологій
Кафедра інтегрованих електротехнологій та енергетичного
машинобудування

ГІДРОГАЗОДИНАМІКА

Частина 1
Методичні вказівки
до виконання практичних робіт

для здобувачів денної та заочної форм навчання
першого (бакалаврського) рівня вищої освіти, спеціальності
142 Енергетичне машинобудування

Харків 2024

Міністерство освіти і науки України
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет енергетики, роботехніки та комп'ютерних технологій
Кафедра інтегрованих електротехнологій та енергетичного машинобудування

ГІДРОГАЗОДИНАМІКА

Частина 1

Методичні вказівки
до виконання практичних робіт

для здобувачів денної та заочної форм навчання
першого (бакалаврського) рівня вищої освіти, спеціальності
142 Енергетичне машинобудування

Затверджено рішенням
Науково-методичної ради факультету енергетики,
роботехніки та комп'ютерних технологій
Протокол № 1 від 22.10.2024 р.

Харків 2024

Схвалено на засіданні кафедри
інтегрованих електротехнологій та енергетичного машинобудування
Протокол № 3 від 11 вересня 2024 р.

Рецензенти:

А. О. Пак – доктор технічних наук, проф. Державного біотехнологічного університету

Т-23 Гідрогазодинаміка: частина 1, метод. вказівки до виконання практич. робіт, для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заоч. форм навч. спец. 142 Енергетичне машинобудування ; Держ. біотехнол. ун-т; уклад.: В.О. Потапов, Д.В. Білий – Харків : [б. в.], 2024.– 55 с.

Методичні вказівки включають 7 практичних робіт та список літератури до них . Практичні заняття є важливою ланкою в підготовці студентів до самостійної інженерної діяльності. Для того, щоб практичні заняття досягли мети, студенти повинні завчасно і систематично готуватися до занять; проявляти самостійність при рішенні задач; розуміти результати їх рішення.

Видання призначене здобувачам першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання спеціальності 142 Енергетичне машинобудування

УДК 533(072)

Відповідальний за випуск: В.О. Потапов, д-р техн. наук
Д. В. Білий, асистент

ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

Методичні вказівки і контрольні завдання призначені для проведення практичних занять з курсу Гідрогазодинаміка .

Практичні заняття є важливою ланкою в підготовці студентів до самостійної інженерної діяльності. Для того, щоб практичні заняття досягли мети, студенти повинні завчасно і систематично готуватися до занять; проявляти самостійність при рішенні задач; розуміти результати їх рішення.

При підготовці до практичних занять кожен студент повинен вивчити теоретичний матеріал за вказаною темою. При цьому необхідно не тільки усвідомити і зрозуміти матеріал, але й самостійно довести всі положення теорії. Крім того, потрібно виділити прикладні питання теорії, які можуть бути потрібні при рішенні задач. Самостійні доведення і висновки є гарним тренуванням і першим кроком до самостійного рішення задач.

Важливо також провести порівняльний аналіз різних методик рішення або різних формул, що використовуються для визначення деяких величин, і чітко з'ясувати області їх застосування.

При вивченні нового матеріалу доцільно записувати всі питання, які залишаються незрозумілими. Постановлення і запис питань сприяє розвитку мислення і формування навичок грамотного викладення своїх думок.

При розв'язанні будь-якої задачі з гідрогазодинаміки можна виділити наступні основні етапи:

- розуміння задачі; - розв'язання задачі в загальному вигляді;
- одержання числового результату;
- аналіз рішення.

Прочитавши задачу, необхідно її зрозуміти, тобто проаналізувати. Для цього потрібно:

- зобразити гідравлічну схему або пристрій, який потрібно обчислити. Якщо схема задана, то її потрібно накреслити, позначивши усі параметри, які входять в умову задачі;
- розібратися у призначенні і взаємодії усіх елементів накресленої схеми;
- дати визначення усіх величин , що входять в умови задачі 1 в першу чергу тієї величини, котру потрібно знайти;
- якщо у вказані визначення входять нові величини, котрі не задані в умові задачі, їх потрібно позначити на схемі. Кожній новій величині дати визначення;
- для цього потрібно установити, яким теоретичним законам або правилам підкорюються величини, які розглянути в аналізі задачі. При цьому велику допомогу може надати перелік формул, котрі були записані в зошит при самостійному опануванні теоретичного матеріалу;
- використовуючи вказані визначення і закони, корисно записати рід величин, починаючи з невідомої і закінчуючи заданими. Між ними повинні бути в логічній послідовності розташовані усі величини, котрі забезпечують логічний перехід від невідомих к заданим величинам;
- закінчуючи аналіз задачі, необхідно виявити в ній ті чи інші обмеження, котрі пред'являються як до величин, що задані в тексті , так до нових величин, що одержані при попередньому аналізі задачі. Кожні обмеження потрібно записати у вигляді відповідного математичного співвідношення;
- закінчивши аналіз задачі, переходять до пошуку алгоритму розв'язання задачі. Цей пошук зводиться до складання ланцюга розрахункових співвідношень, який дозволить

визначити невідомі величини через послідовний ряд заданих і додаткових величин, або до складання системи рівнянь, в яку входять вказані величини.

На рис 1. показана структура процесу розв'язання задач



Рисунок 1 – Схема структури процесу розв'язання задачі

В обох випадках потрібно оцінити раціональність рішення в загальному у вигляді шляхом знаходження невідомих величин у вигляді розрахункових формул. Іноді вигідніше без виводу розрахункових формул одразу перейти к чисельному розв'язанню одержаної системи рівнянь або к поетапному чисельному визначенню усіх величин, котрі входять в послідовний ряд розрахункових співвідношень.

При розв'язанні задачі в загальному вигляді можна здійснити частинну перевірку правильності рішення. Рішення неправильне, якщо не співпадають розмірності окремих складових. При одержанні чисельної відповіді потрібно звернути увагу на вибір одиниць вимірювання і потрібну точність розрахунку тієї чи іншої величини. Не має сенсу, наприклад, обчислювати опір трубопроводу з вісьма значущими цифрами, якщо розміри самої труби визначені з точністю $\pm 0,5\%$, коефіцієнт гідравлічного тертя – з точністю $3...5\%$, прискорення вільного падіння – з точністю $0,5\%$.

Розв'язання задачі потрібно закінчити аналізом одержаного рішення. Такий аналіз включає в себе перевірку правильності рішення, відповідність одержаного рішення теоретичним положенням. Корисно встановити - чи є інший, більш раціональний спосіб розв'язання і т. і.

Необхідно звернути увагу на порядок одержаних величин, оцінити точність рішення.

ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 1.ОСНОВИ СТАТИКИ ТА ДИНАМІКИ

Тема 1. Термодинамічні властивості газів. Статика газів.

1.Обговорення основних положень теми та питань самостійного вивчення:

1.Поняття рідини та її властивості.

.Основні фізичні властивості рідини і газу.

3.Поняття про ідеальну рідину, ідеальний газ і реальну рідину.

4.Сили, які діють в рідині.

5.Рівняння стану ідеального газу, характеристика процесів.

2. Опитування.

3. Практичні завдання.

1. ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ РІДИН

Рідина, як і всяке фізичне тіло, має молекулярну будову, тобто складається з молекул, відстань між якими у багато разів перевищує розміри самих молекул, тобто рідина, строго кажучи, має уривчасту структуру.

Цікавлячись, наприклад, питанням, наскільки великі в даній точці тиск усередині рідини або швидкість її руху, практично важливо знати тиск і швидкість в деякому досить малому обсязі, а не строго саме в даній геометричній точці. Цей обсяг може бути дуже малим. Навіть у такому малому обсязі, як кубик зі стороною 0,001 мм, знаходиться $2,7 \cdot 10^7$ молекул. Цей приклад показує, що заміна реальної рідини її моделлю у вигляді суцільного рідкого середовища не призводить до похибок доти, доки не розглядається рух молекул.

Основні закони, що використовуються в технічній гідромеханіці, ті ж, що й у механіці твердих тіл. Однак застосування цих законів до задач гідромеханіки відрізняється деякими особливостями внаслідок відмінності властивостей рідин та твердих тіл. Тому вивчення технічної гідромеханіки доцільно розпочати з визначення та оцінки основних властивостей рідин.

Рідина – фізичне тіло, що має текучість, здатність змінювати свою форму під дією незначних сил. Основними характеристиками рідин є густина, стисливість, теплове розширення, в'язкість.

Густина однорідної рідини – це відношення її маси m до займаного об'єму V :

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Одиниця густини в СІ – $\text{кг}/\text{м}^3$. Значення густин деяких рідин наведені у додатку

2. Стисливість – властивість рідини змінювати свій об'єм під дією тиску. Вона враховується коефіцієнтом об'ємного стиску β_p , що являє собою відносну зміну об'єму рідини, на одиницю тиску:

$$\beta_p = - \frac{\Delta V}{V_0} \frac{1}{\Delta p}$$

де ΔV – зменшення об'єму при збільшенні тиску на Δp , V_0 – початковий об'єм рідини. Одиниця вимірювання β_p – Па^{-1} . Коефіцієнт об'ємного стиснення β_p зв'язаний з об'ємним модулем пружності E співвідношенням

$$\beta_p = \frac{1}{E}$$

Значення коефіцієнта об'ємного стиснення β_p для деяких рідин наведені у додатку 1.

3. Теплове розширення рідини характеризується температурним коефіцієнтом об'ємного розширення, що являє собою відносну зміну об'єму рідини при зміні температури на 1°C :

де Δt – зміна температури рідини. Значення температурного коефіцієнта об'ємного розширення ($^\circ\text{C}^{-1}$) для деяких рідин наведені у додатку 1.

4. Вязкість – це властивість рідини чинити опір деформації зсуву. Вона проявляється при русі рідини. Сила тертя між шарами рідини

$$\Delta F = \mu \left[\frac{du}{dy} \right] \Delta S$$

де μ – коефіцієнт пропорційності, що називається динамічною в'язкістю, du – приріст швидкості, що відповідає приросту координати dy (рис. 1.1), ΔS – площа поверхні стикання шарів.

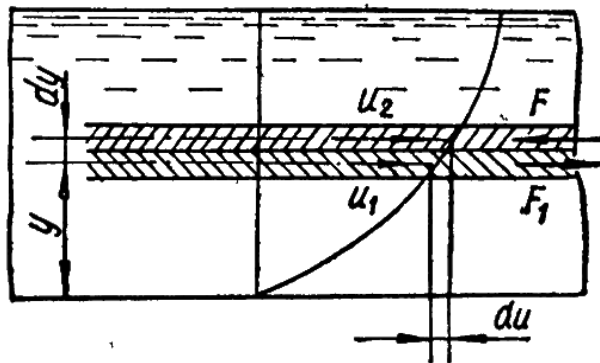


Рисунок 1.1 – Відносний рух шарів рідини

Дотична напруга в рідині

$$\tau = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta S} = \mu \left| \frac{du}{dy} \right|$$

В СІ динамічна в'язкість вимірюється в паскаль-секундах (Па·с).

Поряд з динамічною в'язкістю вводиться поняття кінематичної в'язкості:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Вона вимірюється у $\text{m}^2/\text{с}$, або у $\text{mm}^2/\text{с}$. Значення кінематичної в'язкості для деяких рідин наведені у додатках А, Б, В.

Ідеальна рідина, тобто. така уявна рідина, яка є абсолютно рухомою (нев'язкою) і володіє відсутністю зміни об'єму при зовнішньому впливі. Під час руху ідеальної рідини в

ній не проявляються сили внутрішнього тертя (в'язкість) та відсутні процеси теплопровідності та теплоперенесення.

Найбільш простими властивостями володіє газ, розріджений настільки, що взаємодія між його молекулами може не враховуватися, так званий досконалий (ідеальний) газ. Для досконалих газів справедливе рівняння Клайперону, що дозволяє визначати густину газу при відомих значеннях тиску та температури, тобто

$$\rho = \frac{p}{RT}$$

де p — абсолютний тиск; R — питома постійна газова, різна для різних газів, але не залежна від температури і тиску (для повітря $R = 287$ Дж/(кг · К)); T — абсолютна температура.

Поведінка реальних газів трохи відрізняється від поведінки досконалих газів і для них у широких межах можна користуватися рівняннями стану досконалих газів. Відхилення робляться помітними тільки при сильному стисканні газу і особливо тоді, коли температура газу настільки знижена, що починається зрідження. Зазначені відхилення докладно вивчаються у термодинаміці.

На рідину та всередині рідини можуть діяти зосереджені сили різної природи. Причому дію цих сил може бути безперервно розподіленим за масою, або безперервно розподіленим за площею. У зв'язку з цим сили, що діють на об'єми рідини, що розглядаються і є по відношенню до них зовнішніми силами, поділяють на масові і поверхневі.

Поверхневі сили безперервно розподілені по поверхні рідини і пропорційні величині цієї поверхні при їх рівномірному розподілі. До поверхневих сил відносяться сили тиску P і сили тертя T .

Масові сили пропорційні масі рідкого тіла та для однорідних рідин пропорційні його об'єму. До масових сил відносяться:

- сила тяжіння $G = mg$, де m – маса рідини, g – прискорення вільного падіння;
- сили інерції переносного руху $F = ma$, де a – маса рідини, що діють на рідину при відносному її спокої в судинах, що прискорено рухаються, або при відносному русі рідини в руслах, що переміщуються з тим чи іншим прискоренням.

В гідравліці розглядаються одиничні масові сили та їх проекції на координатні осі, які виражають відповідними прискореннями руху

$$Gm=g, Fm=a$$

Масові сили прийнято відносити до одиниці маси:

$$F_{\text{од}} = \frac{F}{m} = X + Y + Z$$

де X, Y, Z – проекції одиночних масових сил на відповідні осі координат.

Відомо, що будь-яка масова сила є добутком маси на прискорення. Тому кількісно одинична масова сила дорівнює відносному прискоренню.

Рівняння стану термодинамічної системи є аналітичною формулою, що зв'язує параметри стану системи. Якщо стан системи може бути повністю описано за допомогою трьох параметрів: P тиску, V об'єму та T температури, то рівняння стану в найзагальнішому вигляді матиме форму:

$$F(P, V, T) = 0$$

Численні експерименти показують, що більшість газів при нормальних умовах з досить високою точністю можуть бути описані рівнянням стану, що називається рівнянням Клапейрона-Менделєєва:

$$PV = \frac{m}{M}RT \text{ або } PV = \nu RT,$$

де P – тиск газу, V – об'єм, що займає ним, ν – кількість молей газу, R – універсальна газова постійна, T – абсолютна температура.

Абсолютна температура, виміряна за допомогою розглянутого ідеально-газового термометра, пов'язана з температурою, визначеною за шкалою Цельсія, виразом:

$$T = t + 273,15$$

де t – чисельне значення температури за шкалою Цельсія.

Рівняння стану ідеального газу (рівняння Клапейрона), яке зв'язує макроскопічні стани системи даної маси газу при переході із стану 1 у стан 2

$$\frac{P_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{P_2 \cdot V_2}{T_2} \text{ або } \frac{PV}{T} = \text{const}$$

Відношення добутку тиску на об'єм газу певної маси до його температури залишається незмінним для різних станів газу.

Приклади розв'язування завдання.

Приклад 1.1. В вертикальному циліндричному резервуарі діаметром $d = 4$ м зберігається 100 т нафти, щільність якої за 0°C дорівнює 850 кг/м^3 .

Визначити зміну рівня резервуарі при зміні температури нафти від 0 до 30°C . Розширення резервуару не враховувати. Коефіцієнт теплового розширення нафти прийняти рівним $\beta_T = 0,00072 \text{ 1/град}$.

Розв'язання

Об'єм, зайнятий нафтою при температурі 0°C :

$$W = m / \rho = 100 \cdot 10^3 / 850 = 118 \text{ м}^3.$$

Відповідно до формули температурного коефіцієнта об'ємного розширення

$$\beta_t = \frac{\Delta V}{V_0} \frac{1}{\Delta t}$$

зміна об'єму при зміні температури на 30°C .

$$\Delta W = \beta_T W \Delta T = 0,00072 \cdot 118 \cdot 30 = 2,55 \text{ м}^3.$$

Зміна рівня нафти у резервуарі:

$$h = \frac{4\Delta W}{\pi d^2} = 2,554 / (3,1416) = 0,203 \text{ м}$$

Приклад 1.2. Гвинтовий прес Рухгольца для тарування пружинних манометрів працює (рис. 1.2) на маслі з коефіцієнтом стисливості $\beta_w = 0,638 \cdot 10^{-9} \text{ Па}^{-1}$. Визначити, наскільки обертів треба повернути маховик гвинта, щоб підняти тиск на $9,8 \cdot 10^4 \text{ Па}$, якщо початковий об'єм робочої камери преса $W = 0,628 \cdot 10^{-3} \cdot 9,8 \cdot 10^4 \text{ м}^3$, діаметр плунжера 20 мм , шаг винта $h = 2 \text{ мм}$. діаметр плунжера 20 мм . Стінки робочої камери

вважати недеформованими.

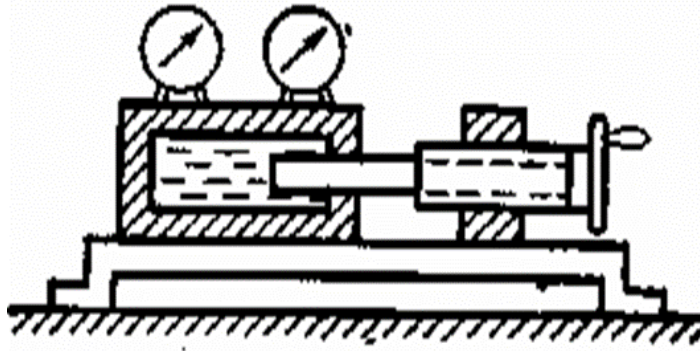


Рис. 1.2. До прикладу 1.2

Розв'язання

Для того щоб тиск підвищився на Δp необхідно, щоб об'єм W рідини в робочій камері преса зменшився (згідно формули коефіцієнта об'ємного стиску β_p

$$\beta_p = - \frac{\Delta V}{V_0} \frac{1}{\Delta p}$$

на величину $\Delta W = \beta_p W \Delta p = 0,638 \cdot 10^{-9} \cdot 0,628 \cdot 10^{-3} \cdot 9,8 \cdot 10^4 \text{ м}^3$

Довжина l , яку має просунути плунжер, дорівнює:

$$l = \frac{4\Delta W}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 3,92 \cdot 10^{-8}}{3,14 \cdot (2 \cdot 10^{-2})^2} = 1625 \cdot 10^{-5} \text{ м}$$

При цьому маховик гвинта необхідно повернути на $n = l / h = 0,125 / 2 \approx 1/16$ обороти.

Приклад 1.3. Атмосферне повітря при температурі $t_1 = 10^\circ\text{C}$ і тискові $p_1 = 150 \text{ кПа}$ займає об'єм 10 м^3 . Визначити величину зміни об'єму повітря, якщо тиск повітря збільшився до $p_2 = 600 \text{ кПа}$, а температура до $t_2 = 90^\circ\text{C}$.

Розв'язання

Використаємо рівняння стану ідеального газу $pW = RT$.

О

с
звідки

$$W_2 = W_1 \frac{p_1}{p_2} \frac{T_2}{T_1}$$

к

і

$$W_2 = 10 \frac{150 \cdot 10^3}{600 \cdot 10^3} \frac{(273+90)}{(273+10)} = 3,21 \text{ м}^3$$

л

Отже величина зміни об'єму повітря становить

ь

$$\Delta W = W_1 - W_2$$

к

$$\Delta W = 10 - 3,21 = 6,89 \cdot \text{м}^3$$

и

Числові значення вихідних даних для розрахунку наведені в таблиці 1.

т

Таблиця 1.

Найменування даних, одиниця виміру	Вар. №1,12	Вар. №2,7	Вар.
Температура			
Атмосферний тиск p_1 , кПа			
Об'єм, m^3			
Тем			

п е р а т у р а а т			
А т м о с ф е р н и й т и с к р ² , к П а			

Практичні завдання

Задача 1. 5 літрів рідини важать 41,7 Н. Визначити її питому вагу і густину (питому масу).

Задача 2. Визначити об'ємну вагу повітря при надлишковому тиску 500 кгс/м² і температурі 200°С.

Задача 3. Визначити підвищення тиску, при якому початковий об'єм води зменшиться на 1,5%.

Задача 4. Визначити підвищення тиску, під яким початковий об'єм води зменшиться на 1,0%. (0,1; 0,2; 0,3; 0,5... варіанти)

Задача 5. На скільки зменшиться і чому буде дорівнювати кінцевий об'єм води з початковою ємністю 2 м³, при збільшенні тиску на $\Delta P=200$ кгс/см².

Задача 6. Визначити температурний коефіцієнт об'ємного (температурного) розширення води β_t , якщо при збільшенні температури з 10 до 20°С об'єм з 800 літрів збільшився на 6 літрів.

Задача 7. Для періодичного акумулювання приросту води, що одержується при зміні температури в системах центрального водяного опалення влаштовують розширювальні резервуари, які приєднуються в системі у верхній її точці і з'єднуються з атмосферою. Визначити найменший об'єм розширювального резервуару, щоб він повністю не випорожнювався. Допустиме коливання температури води під час перерв в топці $\Delta t=95-70=25^\circ\text{C}$. Об'єм води в системі 0,55 м³, коефіцієнт температурного розширення води β_t при $t=80^\circ\text{C}$ становить 0,0006 1/°С.

Задача 8. В опалювальний котел надходить 50 м³ води при температурі 70°С. Який об'єм води буде виходити з котла, якщо нагрів відбувається до кінцевої температури 90°С, а коефіцієнт температурного розширення $\beta_t = 0,00064$ 1/°С.

Задача 9. Зазор між двома пластинами, з яких одна нерухома, а друга пересувається зі швидкістю 2 см/с, заповнений рідиною. Напруження тертя на поверхні пластини $\tau=0,04$ Па. Визначити динамічну в'язкість рідини при висоті зазору в 1 мм.

Питання для контролю знань

1. Як визначають густину і питому вагу однорідної рідини? Який зв'язок існує між густиною і питомою вагою?
2. Що називають питомим об'ємом? В яких випадках використовують це поняття?
3. Який зв'язок існує між густиною, температурою і тиском для ідеальних газів?
4. Що називають числом Маха? За яких значень числа Маха можна не враховувати стисливість повітря?
5. Що називають швидкістю звуку? Як визначають цю величину для краплинних рідин і для газів у випадку адіабатної течії?
6. Що називають стисливістю рідин? Якими коефіцієнтами характеризується стисливість? Зв'язок між ними.
7. Чим характеризується температурне розширення рідин?
8. Що називають в'язкістю рідин і газів?
9. Запишіть закон Ньютона –Петрова.
10. Якими коефіцієнтами характеризується в'язкість? Розмірність цих коефіцієнтів в системах одиниць вимірювання СГС, СІ.

Тема 2. Визначення гідростатичного тиску в точці рідини

1. Обговорення основних положень теми та питань самостійного вивчення:

1. Поняття про гідростатичний тиск.
2. Властивості гідростатичного тиску.
3. Основні рівняння спокою рідини та їх зміст.
4. Види гідростатичного тиску.

2. Опитування.

3. Практичні завдання.

2. ОСНОВНЕ РІВНЯННЯ ГІДРОСТАТИКИ

Гідростатичним тиском в точці називається напруга стиснення в ній, що дорівнює

$$p = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta S}$$

де ΔS – елементарна площадка, що містить дану точку; ΔP – нормальна стислива сила, що діє на цю площадку.

Гідростатичний тиск направлений по нормалі до площадки, в даній точці по всім напрямкам однаково, залежить від положення точки у рідині, яка знаходиться у спокої.

Одиницею тиску в СІ є паскаль (Па).

Рівновага рідини описується диференціальним рівнянням Ейлера, в результаті перетворень яких може бути одержано основне рівняння рівноваги у диференціальній формі:

де dp – повний диференціал тиску; X , Y , Z – проекції прискорення масових сил на координатні осі; dx , dy , dz – приріст координат.

=
ρ

Якщо на рідину діє тільки сила ваги і вісь направлена вертикально вгору, то $X=0, Y=0, Z=-$

$$\frac{p}{\rho g} + z = \text{const}$$

де p – тиск в точці, розташованій на висоті z від горизонтальної площини порівняння $O-O$ (рис. 2.1)

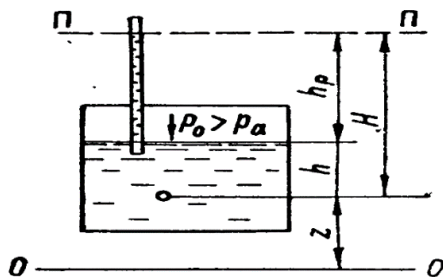


Рисунок 2.1.

Повний (абсолютний) гідростатичний тиск у будь-якій точці рідини

$$\rho g h,$$

де p_0 – тиск на вільній поверхні, $\rho g h$ – вага стовпа рідини висотою h з площею поперечного перерізу, рівній одиниці (h – глибина занурення точки).

Поверхні рівня (поверхні рівного тиску) у даному випадку є горизонтальні площі. З рівняння (2.1) при $p = \text{const}, dp = 0, X = 0, Y = 0, Z = -g$ одержимо

В ідеальному газі, тобто газі, що підпорядковується закону Клапейрона, що знаходиться в рівновазі під дією сили тяжіння, розподіл тиску за умови сталості температури за висотою ($T = \text{const}$) визначається барометричною формулою:

$$p = p_0 e^{-\frac{\rho_0 \cdot g \cdot (z_0 - z)}{p_0}}$$

де p_0, ρ_0 — відповідно абсолютний тиск та густина газу в точках горизонтальної площини з координатою z_0 .

З формули барометричного нівелювання, яка дозволяє визначати різницю висот за показаннями двох барометрів, можна знайти висоту:

$$z_0 - z = \frac{p_0}{\rho_0 \cdot g} \ln \frac{p}{p_0}$$

П'езометр вимірює надлишковий тиск на поверхні рідини в посудині. При цьому п'езометрична висота дорівнює:

$$h_p = \frac{p_0 - p_a}{\rho g} = \frac{\Delta p}{\rho g}$$

де p_a — атмосферний тиск.

Якщо $\Delta p > 0$, то п'єзометрична поверхня розташовується вище за рівень рідини в посудині; якщо $\Delta p < 0$, вона знаходиться нижче рівня рідини; якщо $p_0 = p_a$, то п'єзометрична поверхня збігається з поверхнею рідини.

Надлишковим або манометричним тиском називається різниця між абсолютним і

$$p_{над} = p - p_a.$$

Вакуум (розрідження) – це недолік тиску до атмосферного

$$P_{вак} = p_a - p.$$

Величини

$$h_{над} = \frac{p_{над}}{\rho g} = \frac{p - p_a}{\rho g}$$

$$h_{вак} = \frac{p_{вак}}{\rho g} = \frac{p_a - p}{\rho g}$$

та

називаються відповідно п'єзометричною і вакууметричною висотами.

Площина П-П, у всіх точках якої тиск дорівнює атмосферному, називається п'єзометричною площиною. Якщо посудина відкрита, то п'єзометрична площина співпадає з вільною поверхнею рідини. Для закритої посудини п'єзометрична площина може розташовуватися і вище вільної поверхні рідини (при $p_0 > p_a$) і нижче неї (при $p_0 < p_a$). Надлишковий тиск у будь-якій точці рідини

$$p_{над} = \rho g H,$$

де H – глибина занурення точки під п'єзометричною площиною.

Приклади розв'язування завдання.

Приклад 2.1. Визначити об'єм води ($\gamma = 9,8 \text{ кН/м}^3$) в циліндричному резервуарі діаметром $d = 2,5 \text{ м}$, якщо манометр підключений на висоті $z = 1,5 \text{ м}$ від дна показує тиск $p_m = 55 \text{ кПа}$.

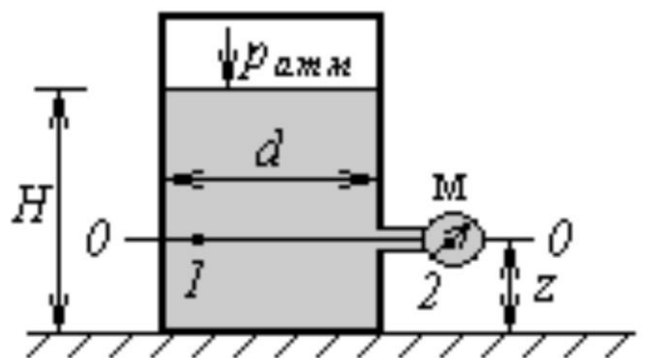


Рисунок 2.2. До прикладу 2.1

Розв'язання. Об'єм води циліндричного резервуару $W = H\omega$, де H – рівень води в резервуарі;

ω - площа поперечного перерізу

Проведено горизонтальну площину порівняння $0-0$ через центр манометра, на якій вибрані дві точки т.1 і т.2 для яких записано рівняння діючих тисків

$$p_{m1} = \gamma H - \gamma z$$

$$p_{m1} = p_m$$

Так, як площина порівняння є і площиною рівного тиску, то $p_{m1} = p_{m2}$,

тобто $\gamma H - \gamma z = p_m$, звідки
$$H = \frac{p_m + \gamma z}{\gamma}$$

$$H = \frac{55 \cdot 1000 + 9,8 \cdot 1000 \cdot 1,5}{9,8 \cdot 1000} = 7,11 \text{ м}$$

Отже об'єм води циліндричного резервуару становить

$$= 7,11 \cdot 4,90 = 34,84 \text{ м}^3$$

Числові значення вихідних даних для розрахунку наведені в таблиці 2.

Таблиця 2.

Найменування даних, одиниця виміру	Вар. №1,12	Вар. №2,7
Діаметр циліндричного резервуара d , м		
Висота підключення манометра z , м		
T		

Приклад 2.1. В закритому резервуарі з нафтою щільністю $\rho = 880 \text{ кг/м}^3$ вакуумметр, встановлений на кришці, показує $p_v = 1,18 \cdot 10^4 \text{ Па}$ (рис. 2.3).

Визначити показання манометра p_m , приєднаного до резервуару на глибині $h = 6 \text{ м}$ від поверхні рідини, та положення п'єзометричної площини.

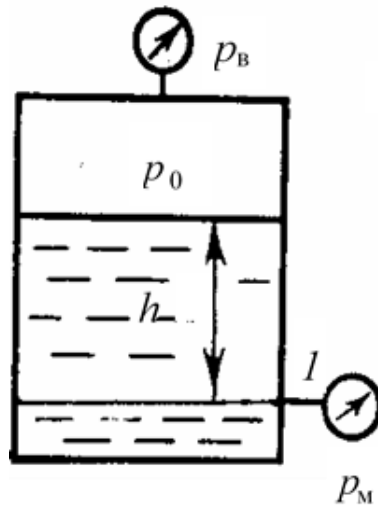


Рис. 2.3. До прикладу 2.2

Розв'язання. Проведемо площину 1-1 лише на рівні приєднання манометра. У цій площині абсолютний тиск, відповідно до основного рівняння гідростатики, дорівнює:

$$p_{1-1} = C + \rho gh,$$

де p_0 — Абсолютний тиск на поверхні, що дорівнює $(p_a - p_B)$.

Тоді

$$p_{1-1} = (p_a - p_B) + \rho gh.$$

З іншої сторони, так як манометр вимірює надмірний тиск, то

$$p_{1-1} = p_a + p_B.$$

Прирівнявши ці два вирази для p_{1-1} , знайдемо:

$$p_M = -p_B + \rho gh = -1,18 \cdot 10^4 + 880 \cdot 9,8 \cdot 6 = 3,99 \cdot 10^4 \text{ Па.}$$

Оскільки на поверхні рідини тиск менше атмосферного, то п'єзометрична висота h_{π} негативна:

h

p

тобто п'єзометрична площина розташована нижче поверхні рідини.

=

Приклад 2.3. Знайти надлишковий тиск у посудині А з водою за показаннями багатоступеневого дворідинного ртутного манометра (рис. 2.4):

$$h_1 = 82 \text{ см}; h_2 = 39 \text{ см}; h_3 = 54 \text{ см}; h_4 = 41 \text{ см}; h_5 = 100 \text{ см};$$

$$\rho_B = 10^3 \text{ кг/м}^3; \rho_P = 1,36 \cdot 10^4 \text{ кг/м}^3.$$

де ρ_B, ρ_P — щільності води та ртуті відповідно.

Розв'язання. Оскільки рідина знаходиться в рівновазі, то тиску в точках 1 і 2, розташованих на одній горизонталі, рівні як тиску в точках одного і того ж обсягу однорідної рідини, що покоїться, тобто $p_1 = p_2$. На тій самій підставі $p_3 = p_4, p_5 = p_6$.

Водночас надлишковий тиск:

$$p_1 = \rho_P g(h_1 - h_2);$$

$$p_3 = p_2 - \rho_B g(h_3 - h_2);$$

$$p_5 = p_4 + \rho_P g(h_3 - h_4);$$

$$p_A = p_6 - \rho_B g(h_5 - h_4).$$

Виключивши із цих співвідношень проміжні тиску p_2, p_4, p_6 , отримаємо:

$$p_A = \rho_p g [(h_1 - h_2) + (h_3 - h_4)] - \rho_v g [(h_3 - h_2) + (h_5 - h_4)] =$$

$$= 1,36 \cdot 104 \cdot 9,8 \cdot (0,43 + 0,13) - 103 \cdot 9,8 \cdot (0,15 + 0,59) = 67,4 \text{ кПа.}$$

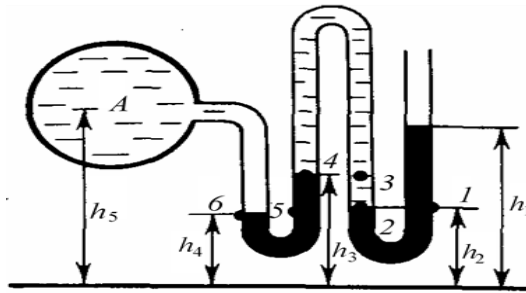


Рис. 2.4. До прикладу 2.3

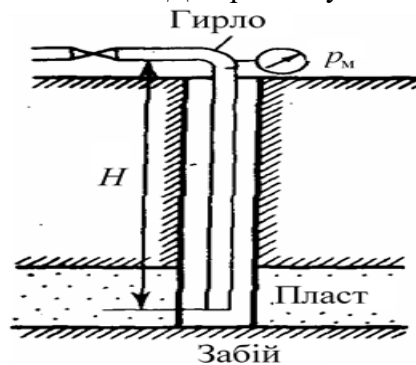


Рис. 2.5. До прикладу 2.4

Приклад 2.4. Визначити тиск на вибої закритої газової свердловини (рис. 2.5), якщо глибина свердловини $H = 2200$ м, надлишковий тиск на гирлі $p_m = 10,7$ МПа, щільність природного газу при атмосферному тиску і температурі в свердловині (вважається незмінною по висоті) $\rho = 0,76$ кг/м³, атмосферний тиск $p_a = 98$ кПа.

Розв'язання. Для визначення тиску на забої газової свердловини скористаємося барометричною формулою

$$p = p_e \frac{\rho_0 \cdot g \cdot (z_0 - z)}{p_0}$$

де p_0 — абсолютний тиск на гирлі свердловини:

$$p_0 = p_a + p_m = 98 \cdot 10^3 + 10,7 \cdot 10^6 = 10,8 \cdot 10^6 \text{ Па}$$

ρ_0 — щільність при тиску p_0 , $z_0 - z = 2200$ м.

З рівняння стану газу випливає, що

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \frac{p_a}{p} = \frac{0,76}{98 \cdot 10^3} = 7,76 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-2}/\text{м}^2$$

а показник ступеня

$$\rho_0 g (z_0 - z) = 7,76 \cdot 10^{-6} \cdot 9,8 \cdot 2200 = 0,167.$$

Тоді

МПа.

Практичні завдання

Задача 1. Визначити абсолютний (повний) гідростатичний і надлишковий тиск на дні ємності з водою, глибина якого 1,2 м, якщо над водою тиск атмосферний.

Задача 2. Визначити повний гідростатичний тиск і вакуум в точці, розташованій на глибині 0,5 м в ємності з густиною $\rho = 800 \text{ кг/м}^3$. Тиск на вільній поверхні рідини складає $P_0 = 0,9P_{atm}$

Задача 3. Визначити всі види гідростатичного тиску в ємності з рідиною на глибині 3 м, при тиску на вільну поверхню рідини $2 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Густина рідини складає $0,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Задача 4. До вільної поверхні площею 10 см^2 ємності з водою глибиною 50 см прикладена поршнем сила 50 Н. Визначити гідростатичний тиск на всю площу дна ємності 100 см^2 .

Задача 5. Визначити глибину води h_1 в ємності, що сполучається з ємністю з рідиною, густина якої $\rho_2 = 860 \text{ кг/м}^3$ і її глибина над площею розділу $h_2 = 0,73 \text{ м}$.

Задача 6. Визначити вакуум P_v у верхній частині ємності з водою в точці 3, якщо у правому коліні U-подібної трубки знаходиться масло, з густиною $\rho_m = 850 \text{ кг/м}^3$. Висота стовпів рідин: $h_1 = 0,342 \text{ м}$; $h_2 = 0,8 \text{ м}$.

Задача 7. Визначте тиск на дні океану, якщо $H = 9 \text{ км}$, $\rho = 1,03 \text{ г/см}^3$. Вважати морську воду нестисливою. Як зміниться густина води, якщо врахувати стисливість. Прийняти $K = 2030 \text{ МПа}$.

Задача 8. Визначити тиск рідини на дно циліндра (рис. 2.2), якщо зусилля на штоку циліндра $F = 10 \text{ кН}$, діаметр циліндра $D = 100 \text{ мм}$, висота циліндра $h = 250 \text{ мм}$, густина рідини $\rho = 900 \text{ кг/м}^3$. Яку частку у відсотках складає ваговий тиск від поверхневого тиску?

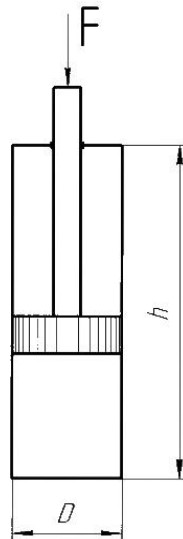


Рисунок 2.5

Задача 9. Визначте силу тиску на дно конічного резервуара, заповненого водою, якщо діаметр основи конуса $D = 1,5 \text{ м}$, $\rho = 1 \text{ г/см}^3$, висота конуса $H = 2 \text{ м}$. Як зміниться тиск, якщо конус замінити циліндром такого ж діаметру і висоти?

Задача 10. Визначте силу F , котра діє на шток поршня (рис. 2.3), якщо діаметр поршня гідроциліндру $D = 100 \text{ мм}$, а тиск під поршнем $P = 100 \text{ кгс/см}^2$.

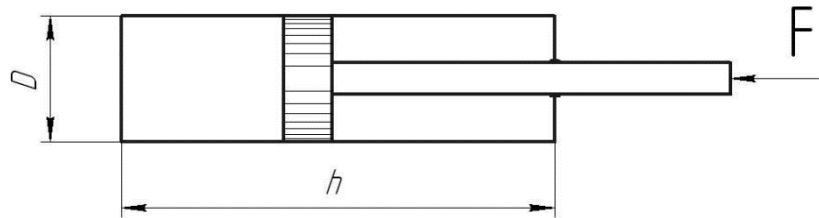


Рис. 2.6

Задача 11. Визначте абсолютний тиск, якщо показання п'езометра $h = 150$ мм рт. ст. Відносна густина ртуті $\delta_{рт} = 13,6$. Атмосферний тиск $P_{атм} = 1,03$ кгс/см²

Задача 12. Визначте надлишковий тиск повітря, якщо густина повітря $\rho = 2,1$ кг/м³, $t = 50^\circ\text{C}$, $R = 287$ Дж/кг град, $P_{атм} = 1$ кгс/см²

Задача 13. Визначте $h_{вак}$ і побудуйте епюри тиску на стінку водяного вакуумметра (рис. 2.4), якщо: $P_{абс} = 85$ кПа; $P_{атм} = 10^5$ Па.

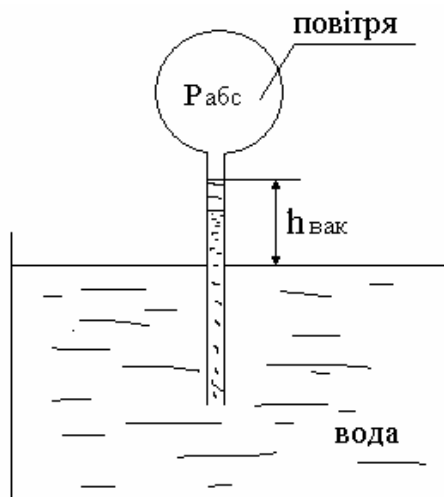


Рисунок 2.7

Питання для контролю знань

Що називають гідростатичним тиском? Що таке середній тиск і тиск у точці рідини? Які одиниці вимірювання тиску в системах СГС, СІ, технічній системі? Які використовують несистемні одиниці тиску?

В чому полягає геометричний і фізичний сенс основного рівняння гідростатики?

Що називають абсолютним тиском, манометричним тиском і вакуумом?

Чому дорівнює максимальна величина вакууму?

Як обчислити тиск в будь-якій точці рідини?

Тема 3. Визначення сили гідростатичного тиску на плоску поверхню. Побудова епюр гідростатичного тиску.

1. Обговорення основних положень теми та питань самостійного вивчення:

1. Сила піску на плоску поверхню.
2. Центр тиску плоскої поверхні.
3. Епюра гідростатичного тиску.

2. Опитування.

3. Практичні завдання.

РОЗРАХУНОК ТИСКУ РІДИНИ НА ПЛОСКІ І КРИВОЛІНІЙНІ ПОВЕРХНІ

Надлишкова сила гідростатичного тиску на плоску стінку дорівнює тиску в центрі ваги стінки, помноженій на її площу,

де h_c – глибина занурення центру ваги стінки під вільною поверхнею (рис. S – площа стінки; p_0 – надлишковий тиск на вільній поверхні рідини).

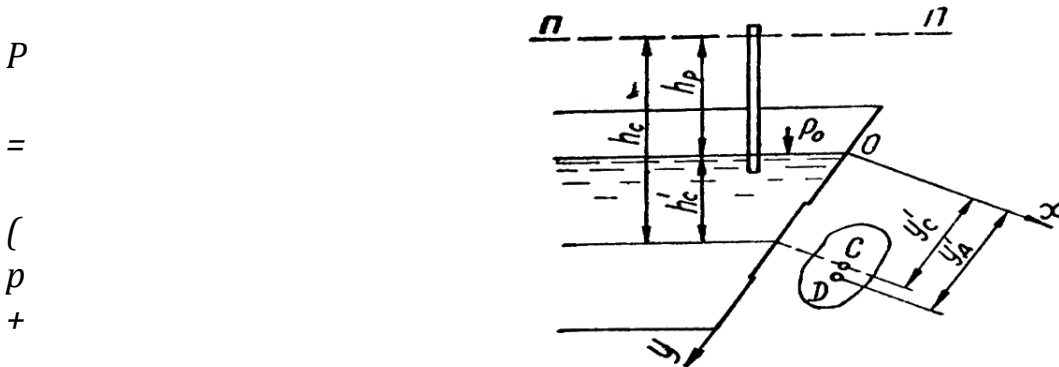


Рисунок 3.1 – Схема до визначення сили тиску на плоску стінку

Формулу (3.1) можна переписати у вигляді

$$P = P_0 + P_p,$$

де $P_0 = p_0 S$ – сила, обумовлена зовнішнім тиском; $P_p = \rho g h_c S$ – сила, обумовлена тільки тиском рідини.

Сила P_0 прикладена в центрі ваги стінки, сила P_p – в центрі тиску, координата якого визначається за формулою

$$y'_D = y'_C + \frac{J_0}{S y'_C}$$

де y'_C – координата центра ваги; J_0 – момент інерції плоскої фігури відносно центральної осі.

Надлишкова сила тиску на плоску стінку

$$P = \rho g h_c S,$$

де h_c – відстань від центра ваги стінки до п'єзометричної площини $\Pi-\Pi$.

Приклади розв'язування завдання

Приклад 3.1. Визначити величину і точку прикладання сили тиску води на вертикальний щит шириною $b = 2,0$ л, якщо глибина води перед щитом $H = 2,5$ л.

Розв'язання

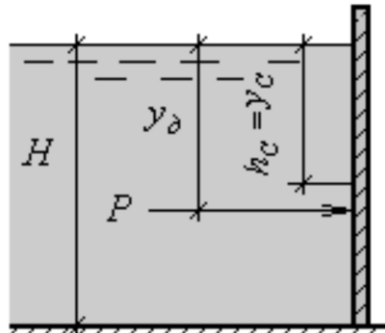


Рисунок 3.3. До прикладу 3.1

Сила тиску на прямокутний щит визначається за залежністю $P = \rho g h_c \omega$, де h_c – глибина занурення центра ваги змоченої частини плоскої поверхні

$$h_c = y_c = \frac{H}{2}$$

$$h_c = y_c = \frac{H}{2} = \frac{2,5}{2} = 1,25 \text{ м}$$

Оскільки щит (плоска поверхня) вертикальний, то $h_c = y_c$

у

- с
- координата центра ваги;
- площа змоченої частини плоскої поверхні $\omega = Hb$

Отже сила тиску на вертикальний щит становить

$= 1000 \cdot 9,81 \cdot 1,25 \cdot 5,0 = 61,31 \text{ кН}$

Результатна глибина прикладення сили тиску визначається за формулою

$$y_d = y_c + \frac{I_o}{y_c \omega}, \text{ де}$$

I_o – момент інерції, який для прямокутної форми щита становить

$$I_o = \frac{2,0 \cdot 2,5^3}{12} = 2,60 \text{ м}^4$$

$$y_d = 1,25 + \frac{2,60}{1,25 \cdot 5,0} = 1,67 \text{ м}$$

Приклад 3.2. Вертикальна стінка (рис. 2.11) довжиною $l = 3$ м (в напрямку, перпендикулярному до площини креслення), шириною $b = 0,7$ м і висотою $H_0 = 2,5$ м поділяє басейн з водою на дві частини. У лівій частині підтримується рівень води $H_1 = 2$ м, в правій — $H_2 = 0,8$ м.

Знайти величину перекидаючого моменту, що діє на стінку, а також визначити, чи стінка буде стійка проти перекидання, якщо щільність матеріалу стінки $\rho_{ст} = 2500 \text{ кг/м}^3$.

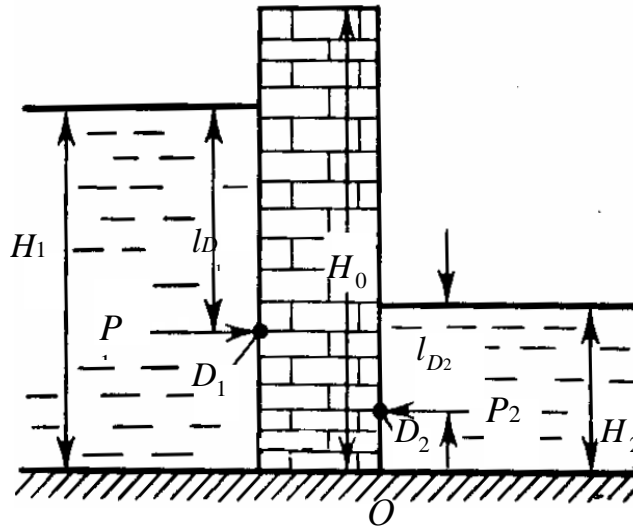


Рис. 3.4. До прикладу 3.2

Розв'язання. Знайдемо силу тиску води на стіну ліворуч. Оскільки на поверхні атмосферний тиск, топ'езометрична площина збігається з поверхнею рідини:

$$p_T - p_a = \rho g \frac{H_1}{2}$$

$$P = \rho g \frac{H_1}{2} l H_1 = 10^3 \cdot 9,8 \cdot 2 / (2 \cdot 3 \cdot 2) = 58,8 \cdot 10^3 H_1 = 58,8 \text{ кН.}$$

Координата центру тиску

$$l_D = l_T + \frac{J}{l_T S}$$

Для прямокутної стінки

$$J = \frac{l H_1^3}{12}$$

Тоді

$$l_{D1} \frac{H_1}{2} + \frac{l H_1^3}{12 \frac{H_1}{2} H_1 l} = \frac{4}{3} M$$

Так само справа:

$$P_2 = \rho g \frac{H_2}{2} l H_2 = 9,41 \text{ кН}$$

$$l_{D2} = 0,533 \text{ м}$$

Перекидаючий момент, тобто момент сил тиску рідини щодо точки O (див. рис. 3.1)

$$M_{\text{пер}} = P_1 \left(H_1 - \frac{2}{3} H_1 \right) - P_2 \left(H_2 - \frac{2}{3} H_2 \right) = 58,8 \cdot 10^3 \cdot \frac{2}{3} - 9,41 \cdot 10^3 \cdot \frac{0,8}{3} = 3,67 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Стійкість проти перекидання повідомляє стінці момент сили тяжіння щодо нульової точки:

$$M_{\text{тяж}} = H l b \rho_{\text{ст}} g \frac{b}{2} = 2,5 \cdot 3 \cdot 0,7 \cdot 2500 \cdot 9,8 \cdot 0,35 = 4,5 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Оскільки $M_{\text{тяж}} > M_{\text{пер}}$, то стінка стійка.

Приклад 3.3. Для зливу рідкої субстанції зі сховища є квадратний патрубок зі

стороною $h = 0,3$ м, шарнірно закритий закріпленої у точці O кришкою. Кришка спирається на торець патрубку та розташована під кутом 45° ($\alpha = 45^\circ$) до горизонту (рис. 2.12).

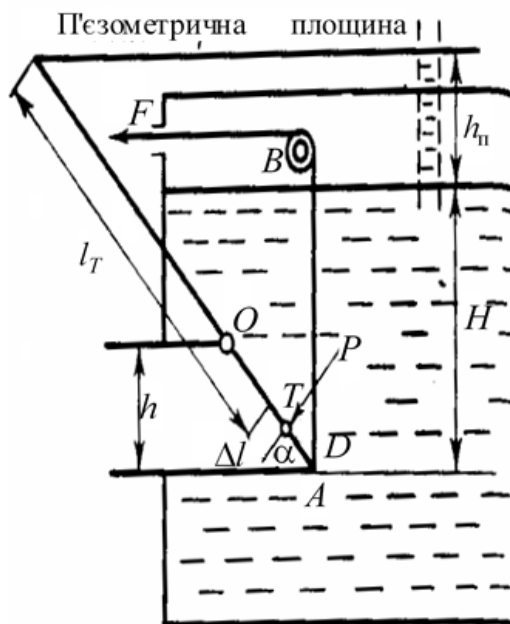


Рис. 3.5. До прикладу 3.3

Визначити (без урахування тертя в шарнірі O і рамці B) силу F натягу троса, необхідну для відкриття кришки AO , якщо рівень рідини $H = 3$ м, тиск над нею, виміряний манометром, $p_M = 5$ кПа, а щільність $\rho = 700$ кг/м³. Вагу кришки не враховувати.

Розв'язання. Знайдемо силу тиску стінки AO .

Р

О Центр тяжіння цієї стінки знаходиться на глибині $h_T = H - h / 2$, $\Delta p = p_M$, тобто

З
$$P = [p_M + \rho g (H - \frac{h}{2})] s = [5 \cdot 10^3 + 700 \cdot 9,8 \cdot (3 - \frac{0,3}{2})] \frac{0,3^2}{\sin 45^\circ} = 3,13 \text{ кН}$$

Л Знайдемо тепер відстань між центром тиску та центром тяжіння кришки

Я
$$h_p = \frac{\Delta p}{\rho g} = \frac{p_M}{\rho g} = \frac{5 \cdot 10^3}{9,8 \cdot 700} = 0,729 \text{ м}$$

Н Тоді

У
$$l_T = \frac{h_p H - \frac{h}{2}}{\sin \alpha} = \frac{0,729 \cdot 3 - 0,15}{0,707} = 5,06 \text{ м}$$

О Момент інерції прямокутної стінки щодо горизонтальної осі, що

Ю проходить через центр ваги стінки

$$J = \left(\frac{h}{\sin \alpha} \right)^3 \frac{h}{12} = \frac{h^4}{12 \sin^3 \alpha}$$

З
$$\Delta l = \frac{J}{l_T s} = \frac{h^4 \sin \alpha}{12 l_T \sin^3 \alpha \cdot h^2} = \frac{h^2}{12 l_T \sin^2 \alpha} = \frac{0,09}{12 \cdot 5,06 \cdot 0,5} = 0,003 \text{ м}$$

Ю Знайдемо силу натягу троса з рівняння моментів сил, взятих щодо осі шарніра

$$F \div O A \cos \alpha - P(O T + \Delta l) = 0$$

П Тоді

О
$$F = \frac{P(O T + \Delta l)}{h} = \frac{P \left(\frac{h}{2 \sin \alpha} + \Delta l \right)}{h} = \frac{3,13 \cdot 10^3}{0,3} \left(\frac{0,3}{2 \cdot 0,707} + 0,03 \right) = 2,24 \text{ кН}$$

В
е
р
х
н

Практичні завдання

Задача 1. Визначте силу тиску води на квадратний затвор (рис. 3.6), який встановлений у вертикальній стінці, якщо відома відстань між центром ваги стінки і центром тиску e , а сторона квадрата - a . Вихідні дані до задачі наведені у таблиці .

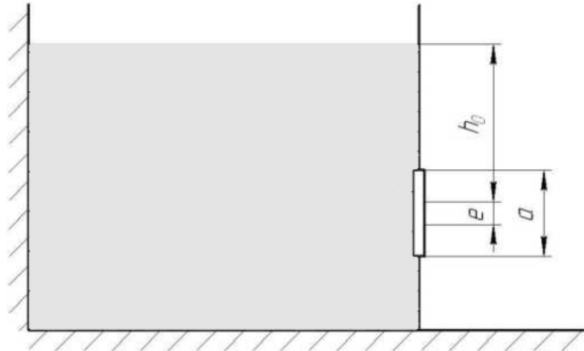


Рисунок 3.6.

Таблиця 3. Вихідні дані для задачі

В			
а			
р			
і			
а			
н			
т			
е			
,			
с			
м			
а			
,			
м			

Задача 2. Побудувати епюри тиску і визначити силу на ділянку 2-3 (рис.3.3), якщо $\rho_1=900 \text{ кг/м}^3$, кг ; $H_1 = 0,5\text{м}$; $\rho_2=1,2 \text{ г/см}^3$; $H_2 = 0,6\text{м}$; $v_1 = v_2 = 0,3\text{м}$ - ширина стінки.

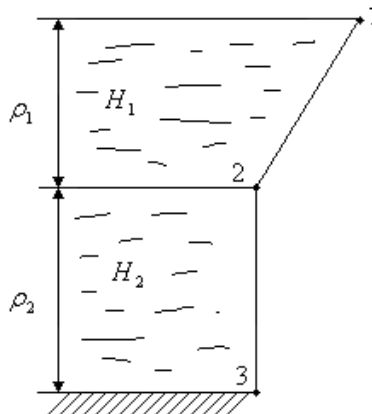


Рисунок 3.7

Задача 3. Побудувати епюри тиску (рис. 3.4), якщо $H_1 = 0,5 \text{ м}$; $H_2 = 0,8 \text{ м}$; $\rho = 0,7 \text{ г/см}^3$;

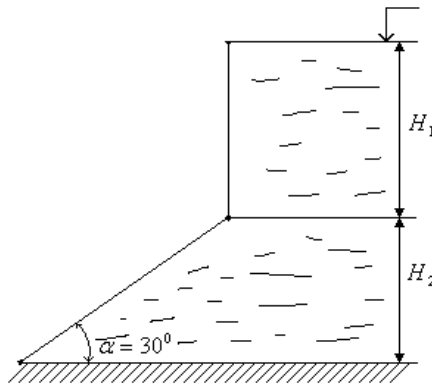


Рисунок 3.8

Задача 4. Побудувати епюри тиску і визначити рівнодійну силу тиску (рис.3.5) графоаналітичним способом $H_1 = 1 \text{ м}$; $H_2 = 0,45 \text{ м}$; $\rho = 1 \text{ г/см}^3$; $v = 0,3 \text{ м}$ - ширина стінки.

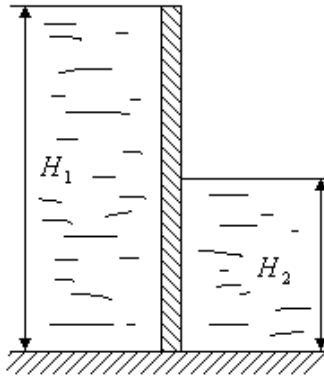


Рисунок 3.9

Задача 5. Побудувати епюри тиску і визначити силу тиску на ділянку 1-2 (рис.3.6), якщо $H_1 = 0,5 \cdot \text{м}$; $H_2 = 0,5 \cdot \text{м}$; $\rho = 700 \text{ г/см}^3$; $v_{1-2} = 0,25 \text{ м}$.

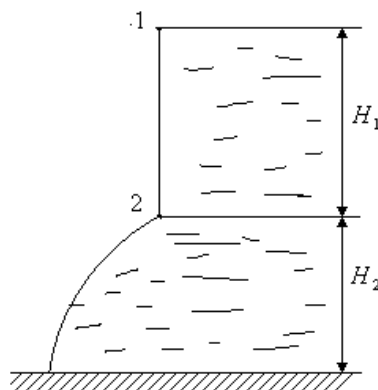


Рисунок 3.10

Задача 6. Побудувати епюри тиску на складну стінку і визначити силу тиску на ділянку 2-3 графоаналітичним способом (рис.3.7), якщо $H_1 = 0,5 \cdot \text{м}$; $H_2 = 0,6 \cdot \text{м}$; $H_3 = 0,4 \text{ м}$; $\rho = 1 \text{ г/см}^3$; $v_{2-3} = 0,3 \text{ м}$.

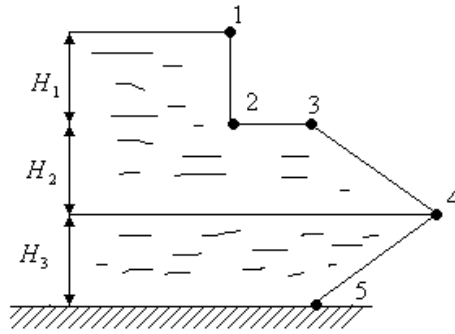


Рисунок 3.11

Задача 7. Побудувати рівнодійну епюру тиску і визначити силу тиску графоаналітичним способом (рис. 3.8), якщо: $H = 1$ м; $b = 1$ м; $\rho_1 = 10^3$ кг/м³; $\rho_2 = 1,2$ г/см³.

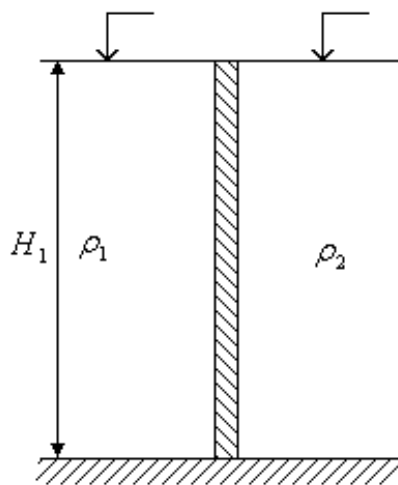


Рисунок 3.12

Задача 8. Побудувати рівнодійну епюру тиску і знайти рівнодійну силу тиску графоаналітичним способом, якщо: $H_1 = 2$ м; $H_2 = 1$ м; $b = 1$ м; $\rho_1 = 1$ г/см³; $\rho_2 = 1,2$ г/см³ (рис.3.9).

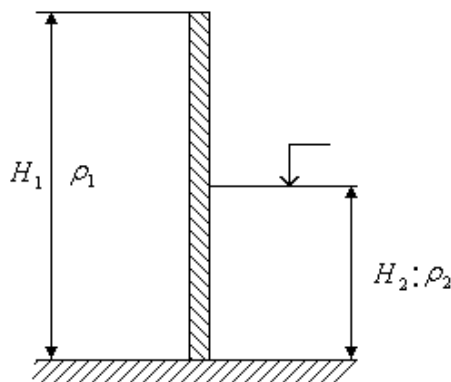
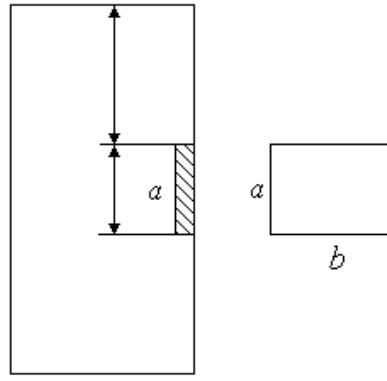


Рисунок 3.13

Задача 9. Визначте силу тиску на прямокутну кришку (рис. 3.10) і координати центра тиску при таких умовах: $a = 0,4$ м; $b = 0,6$ м; $H_0 = 1,5$ м; $\rho = 900$ кг/м³; $I_0 = ba^3/12$.



Р

и
с
р
н
о
к

Задача 10. Побудувати епюру на похилу частину плоскої стінки і визначити рівнодійну силу тиску на цій ділянці графоаналітичним способом, якщо: $H_1 = 3$ м; H_2

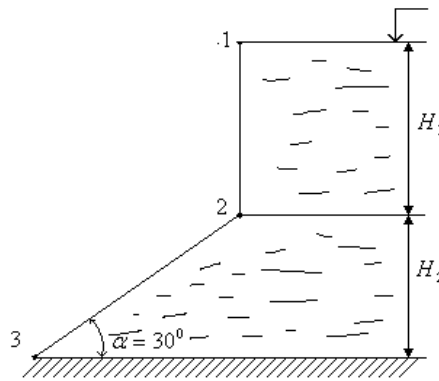


Рисунок 3.15

Задача 11. Визначте натяг троса, який удержує плоский затвор (рис. 3.12) шириною b , якщо глибина води перед тросом h . Вагою затвора знехтувати. Побудувати епюру тиску. Вихідні дані до задачі 10 наведені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. Вихідні дані до задачі 10

В			
а			
р			
і			
а			
н			
т			
В			
,			
м			
Н			
,			
м			

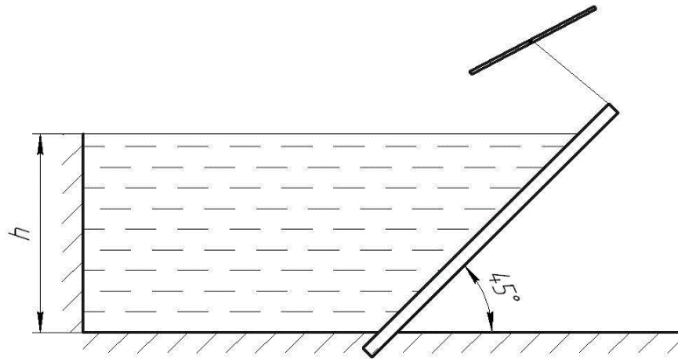


Рисунок 3.16

Задача 12. Визначте силу тиску води на квадратний затвор (рис. 3.13), який встановлений у вертикальній стінці, якщо відома відстань між центром ваги стінки і центром тиску e , а сторона квадрата – a . Вихідні дані до задачі 11 наведені у таблиці 3.2.

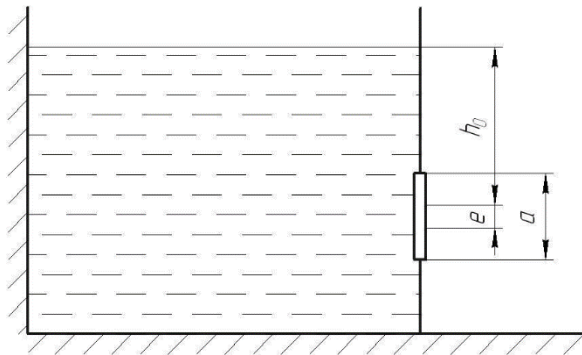


Рисунок 3.17

Таблиця 3.2. Вихідні дані для задачі 11

В а р і а н т			
е, с м			
А, м			

Питання для контролю знань

1. Як визначають рівнодійну силу тиску на плоску горизонтальну і похилу стінки? В чому полягає відмінність цих формул?
2. Що називають центром тиску?
3. Як знаходять координати центра тиску?
4. Що називають тілом тиску. В якому випадку об'єм тіла тиску умовно вважають від'ємною величиною ?

5. Як визначаються горизонтальні і вертикальна складові рівнодійної сили тиску на криволінійну поверхню?
6. Вивести формулу для визначення товщини тонкостінних циліндрів.
7. Які сили діють на рідину у випадках відносного спокою рідини?

Тема 4. . Визначення сили гідростатичного тиску на криволінійну поверхню.

1. Обговорення основних положень теми та питань самостійного вивчення:

1. Сила тиску на криволінійну (циліндричну) поверхню.
2. Побудова «тіла тиску».
3. Плавання тіл (закон Архімеда).

2. Опитування.

3. Практичні завдання.

4. СИЛА СТАТИЧНОГО ТИСКУ РІДИНИ НА КРИВОЛІНІЙНІ СТІНКИ

Сила гідростатичного тиску на криволінійну поверхню

де P_x, P_y, P_z – складові сили надлишкового тиску по відповідним координатним осям.
Для циліндричної криволінійної поверхні (рис. 3.2)

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_z^2}$$

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

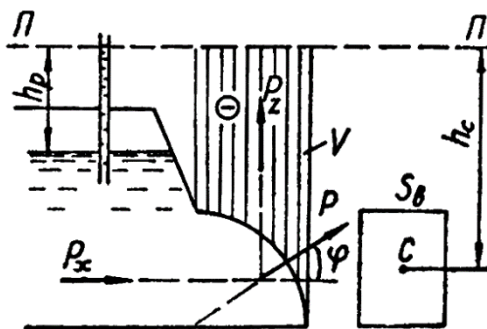


Рисунок 4.1 – Схема до визначення сили тиску на криволінійну стінку

Горизонтальна складова

$$P_x = \rho g h_c S_v,$$

де h_c – відстань від центра ваги вертикальної проекції до п'єзометричної площини; S_v – площа проекції криволінійної поверхні на вертикальну площину.

Вертикальна складова

$$P_z = \rho g V,$$

де V – об'єм тіла тиску – вертикального стовпа рідини, розташованого між п'єзометричною площиною, криволінійною поверхнею і вертикальною проектуючою поверхнею, що проходить по контуру стінки.

Вектор повної сили тиску на циліндричну поверхню проходить через вісь циліндра під кутом φ до горизонту, причому

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{P_z}{P_x}$$

Закон Архімеда: на тіло, занурене в рідину, діє виштовхувальна сила P , що дорівнює за величиною ваги рідини в обсязі зануреній частині тіла V

$$|P| = \rho g V$$

Виштовхувальна (Архімедова) сила прикладена в центрі тяжкості об'єму зануреної частини тіла, що називається центром водотоннажності.

Приклади розв'язування завдання.

Приклад 4.1. У бічній плоскій стінці резервуара з реактивним паливом ($\rho = 800 \text{ кг/м}^3$) є круглий люк діаметром $d = 0,5 \text{ м}$, закритий напівсферичною кришкою (рис. 3.6). Висота

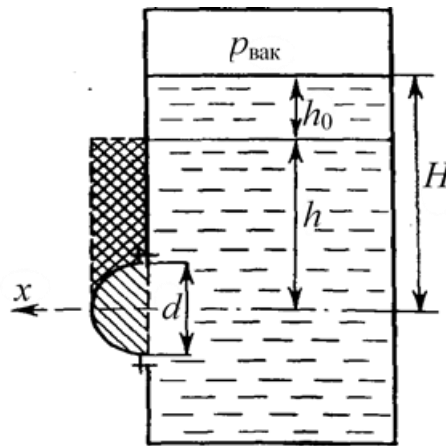


Рис. 4.2. До прикладу 4.1

Розв'язання. Знайдемо положення п'езометричної площини, необхідної для визначення об'єму тіла тиску. Оскільки на вільній поверхні рідини — вакуум, п'езометрична площина лежатиме нижче на відстані

$$h_{\text{п}} = \frac{p_{\text{вак}}}{\rho g} = \frac{4,9 \cdot 10^3}{800 \cdot 9,8} = 0,625$$

Визначимо вертикальну складову сили тиску рідини на кришку. П'езометрична площина лежить вище осі кришки на відстані

$$h = H - h_{\text{п}} = 3 - 0,625 = 2,375 \text{ м.}$$

Для нижньої половини кришки вертикальна складову сили тиску спрямована вниз.

Об'єм тіла тиску для цього випадку дорівнює сумі об'ємів напівциліндра та чверті кулі (на рис. 3.6 заштриховано «зліва вниз»).

Результуюча вертикальна сила дорівнює різниці цих двох сил, спрямована вниз, і об'єм її тіла тиску дорівнює об'єму рідини кришці люка. Тому

$$P_z = \rho g V_{\text{т.д.}} = \frac{1}{12} \rho g \pi l^3 = \frac{\pi}{12} \cdot 800 \cdot 9,8 \cdot 0,5^3 = 257 \text{ Н.}$$

Лінія дії цієї сили проходить через центр об'єму кришки люка на відстані від її основи, що дорівнює

$$x = \frac{3}{16} d \frac{3 \cdot 0,5}{16} = 0,094 \text{ м.}$$

Визначимо горизонтальну складову сили тиску рідини на кришку:

$$P_x = (p_T - p_a)S_B = \rho g h \frac{\pi d^2}{4} = 800 \cdot 9,8 \cdot 2,375 \cdot 3,14 \cdot \frac{0,25}{4} = 3,65 \text{ кН.}$$

Сила спрямована паралельно до осі x , а лінія її дії лежить нижче цієї осі на величину:

$$\frac{J}{I_{Ts}} = \frac{\pi d^4}{64h} \frac{4}{\pi d^2} = \frac{d^2}{16h} = \frac{0,5^2}{16 \cdot 2,375} = 6,6 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Визначимо рівнодіючу сил тиску

$$|P| = \sqrt{P_x^2 + P_z^2} = \sqrt{(3,65 \cdot 10^3)^2 + (0,257 \cdot 10^3)^2} = 3,66 \text{ кН}$$

Косинус кута α між віссю x та лінією дії цієї сили

$$\cos \alpha = \frac{P_x}{|P|} = \frac{3,65 \cdot 10^3}{3,66 \cdot 10^3} = 0,997$$

Тоді $\alpha \approx 4^\circ$.

Приклад 4.2. Конічна вирва з приставним дном знехтувано малої ваги занурена в рідину (рис. 4.3).

Вага рідини обсягом $ABCD$ дорівнює F .

Пояснити, що станеться з дном вирви, якщо:

- у вирву налити ту ж рідину до рівня CD ;
- на дно воронки покласти вантаж вагою P .

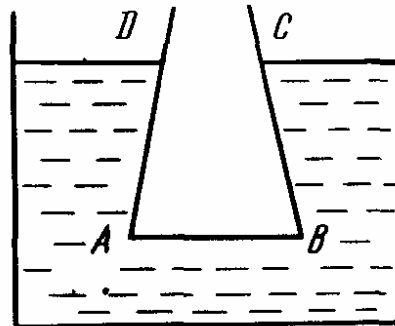


Рис. 4.3. До прикладу 4.2

Розв'язання:

- нічого не станеться
- якщо $P > F$, то дно вирви відійде вниз і разом з вирвою опуститься на дно резервуара з водою.

Приклад 4.3. Визначити силу тиску на напівциліндричний затвор радіусом $R = 1,4$ м і шириною $b = 3$ м, що підтримує рівень води $H = R$. Побудувати «тіло тиску».

Розв'язання.

Сила тиску на напівциліндричний затвор (криволінійну поверхню) визначається за формулою (рис. 4.4)

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_z^2}$$

де P_x – горизонтальна складова сили тиску $P_x = \rho g h_{cz} \omega_z$

h_{cz} – глибина занурення центра ваги вертикальної проекції криволінійної поверхні

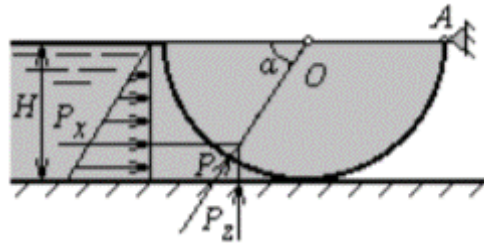


Рис. 4.4. До прикладу 4.3

$$h_{cz} = \frac{H}{2} = \frac{1,4}{2} = 0,7 \text{ м}$$

ω_z – площа вертикальної проекції криволінійної поверхні

$$\omega_z = Hb = 1,4 \cdot 3 = 4,2 \text{ м}$$

$$P_x = 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,7 \cdot 4,2 = 28,84 \text{ кН}$$

Вертикальна складова сили тиску визначається за $P_z = \rho g W_r$

де, W_r – об'єм «тіла тиску».

Об'єм «тіла тиску» - це об'єм обмежений криволінійною поверхнею, вертикальними площинами проведеними з кінців криволінійної поверхні та п'єзометричною площиною.

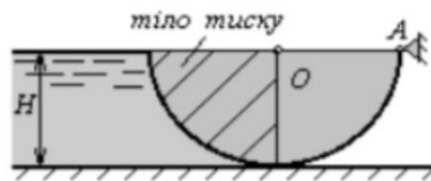


Рис. 4.5. Графічне зображення «тіла тиску»

$$W_r = \frac{\pi R^2}{4} \cdot b = \frac{3,14 \cdot 1,4^2}{4} \cdot 3,0 = 4,62 \text{ м}^3$$

$$P_z = 1000 \cdot 9,81 \cdot 4,62 = 45,32 \text{ кН}$$

Таким чином сила тиску на напівциліндричний затвор становить

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_z^2} = \sqrt{28,84^2 + 45,32^2} = 53,71 \text{ кН}$$

Числові значення вихідних даних для розрахунку наведені в таблиці 3

Таблиця 3

На йм ену ван ня дан их, оди ни ця ви	Вар. №1,12	Вар. №2,7	Вар.

мір у			
Ра діу с на пів ци лі нд ри чо го зат во ру R , m			
Ш ир ин а на пів ци лі нд ри чо го зат во ру b , m			

Практичні завдання

Задача 1. Вертикальний циліндричний резервуар ($d = 2$ м) закритий зверху напівсферичною кришкою того ж діаметра вагою 19,6 кН і повністю заповнений водою. Потім в отвір у верхній частині кришки ввернули вертикальну трубку дуже малого діаметра і залили в неї воду.

Визначити:

- 1) при якій висоті води у трубці вертикальна складова сили тиску рідини врівноважить вагу кришки?
- 2) як має змінитися ця висота, якщо в трубці знаходиться не вода, а гас ($\rho = 810$ кг/м³)?

Задача 2. Циліндричний резервуар зварений з двох полу-циліндричних частин і повністю заповнений рідиною (рис. 4.6). Визначити, при якому положенні (*a*, *б* або *в*) резервуара діючі на зварний шов зусилля, що розтягують, мінімальні. Довжина резервуара більша за його діаметр, заливний отвір завжди знаходиться у верхній його частині і відкрито.

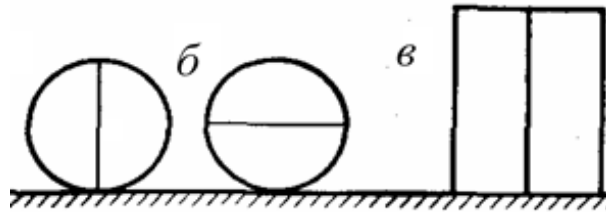


Рис. 4.5. До завдання 2.

Задача 3. Повністю занурений поплавець показчика рівня нафти, що має середню щільність 900 кг/м^3 , плаває на межі поділу нафти та води, що знаходяться в резервуарі-відстійнику. Щільність нафти — 850 кг/м^3 , води — 1000 кг/м^3 . Визначити, яка частина об'єму поплавця у воді?

Задача 4. Який обсяг бензину ($\rho = 740 \text{ кг/м}^3$) можна залити у залізничну цистерну внутрішнім об'ємом 50 м^3 та масою 23 т , щоб вона ще зберігала плавучість у прісній воді? Чи буде під час плавання цистерна стійка?

Задача 5. В днищі резервуару з рідиною ($\rho = 800 \text{ кг/м}^3$) є круглий спускний отвір ($d = 10 \text{ см}$), закритий напівсферичним клапаном (рис. 4.6)

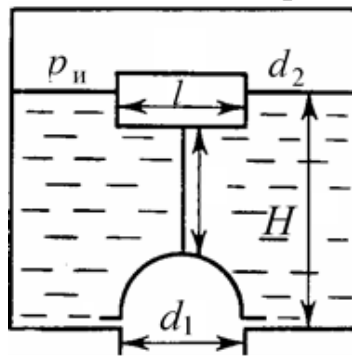


Рис. 4.6. До завдання 5

Визначити при якому діаметрі циліндричного поплавця клапан d_2 автоматично відкривається при досягненні рівня рідини в резервуарі $H = 2 \text{ м}$?

Довжина ланцюжка, що зв'язує поплавець з клапаном, $l = 0,95 \text{ м}$, вага рухомих частин пристрою $G = 30 \text{ Н}$, надлишковий тиск на вільній поверхні рідини $p_n = 49 \text{ кПа}$.

Питання для контролю знань

- 1.Що називається тілом тиску?
- 2.Дайте словесний вираз закону Архімеда.
- 3.Що називається відносним спокоєм рідини?
- 4.Які масові сили діють на частинки рідини у стані відносного спокою?
- 5.Яким співвідношенням описується розподіл тиску у стані відносного спокою при рівноприскореному русі судини з рідиною?
- 6.Що є поверхнею рівня рівного тиску при рівноприскореному русі судини з рідиною?
- 7.Яким співвідношенням описується розподіл тиску у стані відносного спокою при рівномірному обертанні судини з рідиною?
- 8.Що є поверхнею рівня рівного тиску при рівномірному обертанні судини з рідиною?

Тема 5. Розв'язання рівняння Д. Бернуллі

1. Обговорення основних положень теми та питань самостійного вивчення:

1. Рівняння нерозривності для потоку рідини.
2. Рівняння Бернуллі для ідеальної рідини та його тлумачення.
3. Рівняння Бернуллі для потоку реальної рідини та його тлумачення.
4. Втрати напору та його різновиди
5. Коефіцієнт Коріолісу і як він впливає на рух рідини

2. Опитування.

3. Практичні завдання.

5. РІВНЯННЯ БЕРНУЛЛІ

Для двох перерізів потоку крапельної рідини при плавно змінному русі рівняння Бернуллі має вигляд

де v_1 і v_2 – середні швидкості відповідно у першому і другому перерізах; p_1 і p_2 – тиски; перерізів; h_e – втрата питомої енергії (напору) між перерізами.

Рівняння Бернуллі для потоку газу при $\rho = \text{const}$ має вид:

де p_e – втрата тиску.

З енергетичної точки зору член $\alpha v^2/2g$ являє собою питому (віднесена до одиниці маси рідини) кінетичну енергію в перерізі, $p/\rho g$ – питома енергія тиску у певному перерізі, z – питома енергія положення у перерізі.

З геометричної точки зору складові рівняння Бернуллі являють собою наступне: $0-0$ (рис. 3.3), $p/\rho g$ – п'езометричну висоту, яку можна виміряти п'езометричною трубкою, $\alpha v^2/2g$ – висоту швидкісного напору, що дорівнює різниці рівнів у трубках повного і статичного напорів.

Суму висот

$$\frac{\alpha v^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + z = H$$

називають повним напором.

$$l = \frac{h_e}{L} = \frac{\left(\frac{\alpha v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + z_1\right) - \left(\frac{\alpha v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + z_2\right)}{L}$$

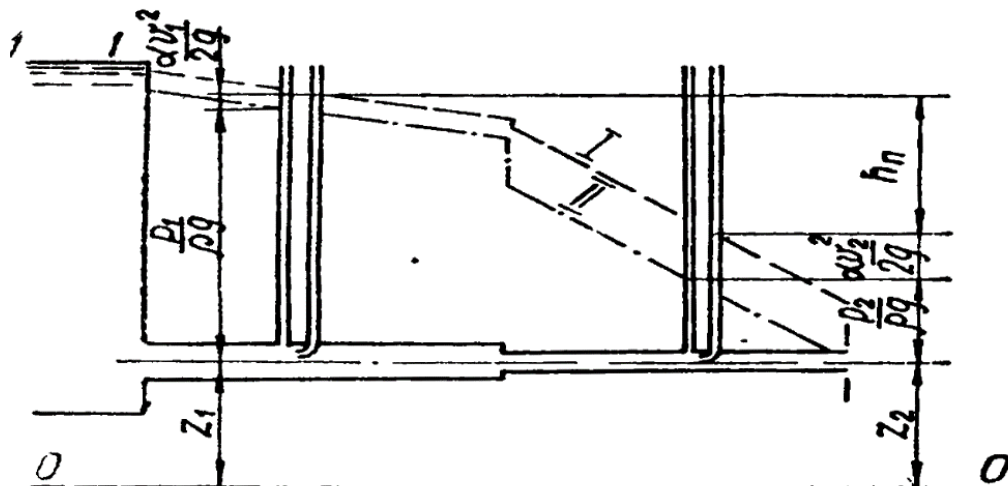


Рисунок 5.1 – Діаграма рівняння Бернуллі

На рисунку 5.1 показана діаграма рівняння Бернуллі, де I – напірна лінія, або лінія повного напору; II – п'езометрична лінія, або лінія зміни п'езометричних висот.

Гідравлічний ухил – зміна повного напору на одиницю довжини:

$$I = \frac{h_s}{L} = \frac{\left(\frac{\alpha v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + z_1\right) - \left(\frac{\alpha v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + z_2\right)}{L}$$

П'езометричний ухил – це зміна п'езометричного напору на одиницю довжини:

$$I_p = \frac{\left(\frac{p_1}{\rho g} + z_1\right) - \left(\frac{p_2}{\rho g} + z_2\right)}{L}$$

Коефіцієнт α (коефіцієнт Коріоліса) являє собою відношення дійсної кінетичної енергії до кінетичної енергії, підрахованої по середній швидкості. При турбулентному режимі руху $\alpha \approx 1$, при ламінарному у круглій трубі $\alpha = 2$.

За допомогою рівняння Бернуллі вирішують велику кількість задач практичної гідрогазодинаміки. Для цього вибираються два перерізи потоку так, щоб в одному з них величини z , p і v були відомі, а у другому невідомою була лише одна величина. Потім вибирається горизонтальна площина порівняння. Її доцільно провести через центр одного з вибраних перерізів, тоді z_1 або z_2 буде дорівнювати нулю. Після спрощень рівняння Бернуллі, записаного для вибраних перерізів, знаходять невідому величину (p , v або z).

При двох невідомих крім рівняння Бернуллі, використовується також рівняння нерозривності руху.

Приклади розв'язування завдання.

П

р *Розв'язання*

и

к

л

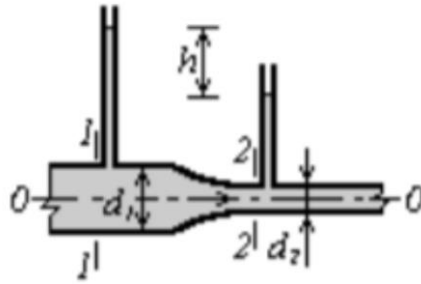


Рисунок 5.2. До прикладу 5.1

Використаємо рівняння Д. Бернуллі для перерізів 1-1 та 2-2 відносно площини порівняння 0-0

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + h_{w_{1-2}}$$

z

$v_1; v_2;$

0
; $h_{w_{1-2}} = 0$

$$z + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{v_2^2}{2g}$$

0 Розрахуємо середню швидкість руху потоку у 2 перерізі

$$v_2 = \frac{Q}{\omega} = \frac{4Q}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 0,009}{3,14 \cdot 0,05^2} = 4,59 \text{ м/с}$$

3 рівняння Д. Бернуллі виражаємо середню швидкість руху потоку у перерізі 1

$$v_1 = \sqrt{v_2^2 - 2gh} = \sqrt{4,59^2 - 2 \cdot 9,81 \cdot 1,0} = 1,20 \text{ м/с}$$

3

$$d_1 = d_2 \sqrt{\frac{v_2}{v_1}} = 0,05 \sqrt{\frac{4,59}{1,20}} = 0,098 \text{ м} \approx 0,1 \text{ м} = 10 \text{ см}$$

0 **Приклад 3.1.** Визначити статичний напір при перебігу стисливої рідини у трубі впростійного перерізу (рис. 3.8).

и **Розв'язання.** У перерізі 1-1: тиск p_1 , відстань z_1 від центру тяжкості перерізу до довільної площини порівняння, середня швидкість v_1 течії, у перерізі 2-2: тиск p_2 , відстань z_2 від центру тяжкості перерізу до площини порівняння та середня швидкість v_2 течії. Якби в трубі текла нев'язка рідина, то в перерізах 1-1 та 2-2 на підставі рівняння Бернуллі повні напори були однаковими, тобто

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g}$$

0

з

р

и

в

У цьому випадку перетин труби постійно, отже, з умови нерозривності — $v_1 = v_2$. Тому при перебігу нев'язкої рідини статичний напір буде постійним

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g}$$

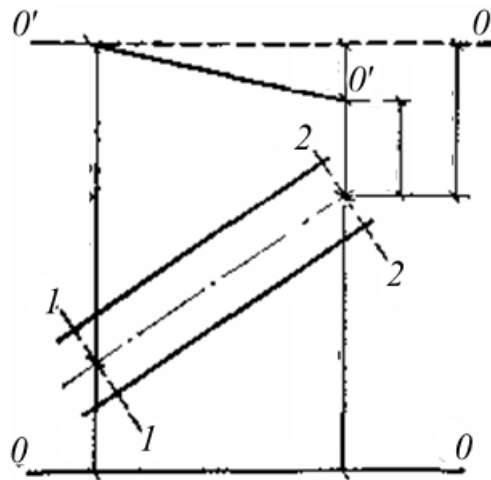


Рис. 5.3. До прикладу 5.2

При перебігу реальної (в'язкої) рідини між перерізами 1-1 і 2-2 відбудуться гідравлічні втрати h_w . Оскільки при перебігу в трубі постійного діаметра $v_1 = v_2$ і, відповідно, $\alpha_1 = \alpha_2$, то рівняння Бернуллі для потоку в'язкої рідини перетворюється на вигляд

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + h_w$$

тобто статичний натиск у перерізі 2-2 зменшиться порівняно з перетином 1-1 на величину h_w

$$z_2 + \frac{p_2}{\rho g} = z_1 + \frac{p_1}{\rho g} - h_w$$

Приклад 5.3. Визначити швидкість перебігу рідини за показанням диференціального манометра (трубки Пито–Прандтля — рис. 5.4).

Розв'язання. Виберемо в потоці лінію струму, що проходить через точку a . Приймемо значення тиску і швидкості потоку на лінії струму, що розглядається, на достатньому віддаленні від точки a в точці з відповідно p_0 і v_0 .

Напишіть рівняння Бернуллі для лінії струму в точках c і a :

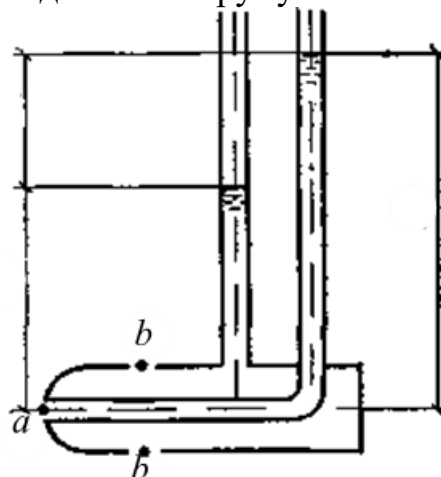


Рис. 5.4. До прикладу 5.3

Якщо «гальмувати» потік у точці a , тобто покласти $v_a = 0$, то p_a буде відповідати повному (статичному та динамічному) тиску в потоці

$$p_a = p_0 + \frac{\rho v_0^2}{2}$$

Повному тиску в потоці буде відповідати рівень h_1 диференціального манометра (див. рис. 5.4).

Для лінії струму, що примикає до точок b (впускні отвори), рівняння Бернуллі матиме вигляд

$$p_0 + \frac{\rho v_0^2}{2} = p_b + \frac{\rho v_b^2}{2}$$

Оскільки $v_b = v_0$, то $p_b = p_0$. Відповідно, у непроточну область диференціального манометра передається статичний тиск p_0 . Цьому тиску буде відповідати рівень h_2 .

Тоді

$$h_1 - h_2 = p_a - p_0 = \frac{\rho v_0^2}{2}$$

тобто диференціальний манометр зареєструє динамічну складову повного тиску в потоці.

Відповідно

$$v_0 = [2(h - h_2)/\rho]^{0,5}$$

Практичні завдання

Задача 1. Визначити витрату води, яка витікає з труби діаметром 45 мм і довжиною 400 м під напором $H=2,5$ м. Площа вільної поверхні води значно більша за переріз трубопроводу.

Задача 2. З напірного баку вода тече по трубі (рис. 5.2) діаметром $d_1 = 20$ мм, а потім витікає в атмосферу через насадок діаметром $d_2 = 10$ мм. Надлишковий тиск повітря в баці $p_0 = 0,18$ МПа; рівень води в баці $H = 1,6$ м. Нехтуючи втратами енергії, визначте швидкість води в трубі v_1 і на виході з насадку v_2 .

Задача 3. Визначити тиск у перерізі 2-2 (рис. 5.3), якщо $Q = 180$ л/хвил; $d_1 = 40$ мм;

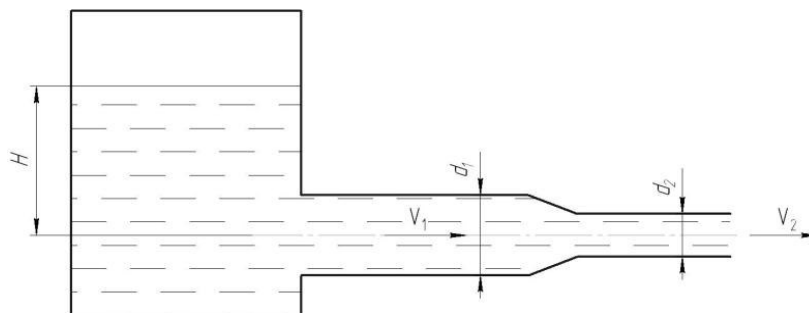


Рисунок 5.2

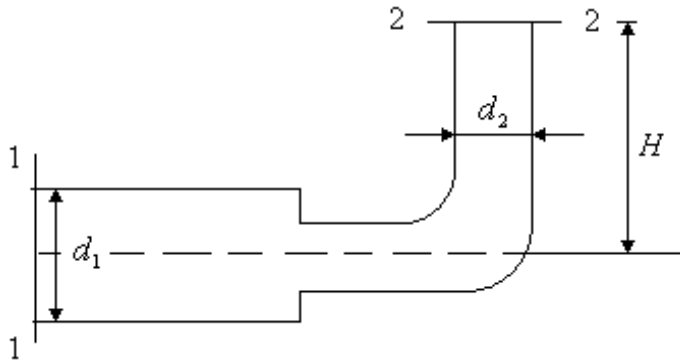


Рисунок 5.3

Задача 4. На яку висоту може всмоктуватись вода з резервуару по трубопроводу, який приєднано до вузького перерізу горизонтального трубопроводу (рис.5.4), якщо:

=

1

л

/

с

р

к

П

а

=

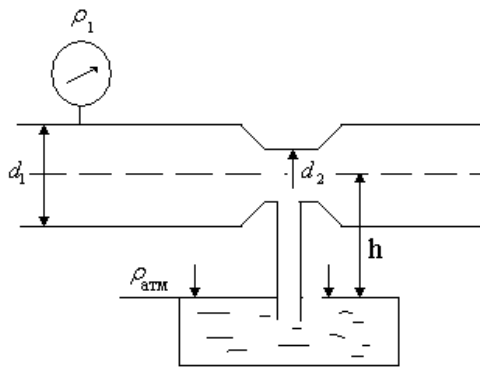


Рисунок 5.4

Задача 5. Визначте витрату води, якщо різниця рівней води в п'езометричних трубках $h = 1,5\text{ м}$; діаметри трубопроводу $D = 40\text{ мм}$; $d = 20\text{ мм}$. (рис. 5.5). Втрати напору не враховувати.

м

м

= 40 мм.

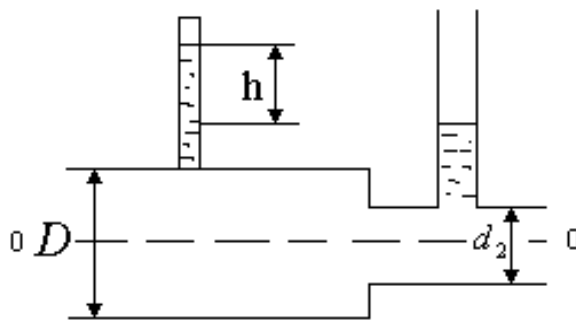


Рисунок 5.5

Задача 6. Визначте витрату води (рис.5.6), якщо: $p_1 = 39240\text{ Па}$; $d_1 = 200\text{ мм}$;

$d_2 = 100\text{ мм}$; $\frac{P_{2\text{вак}}}{\rho g} = 3\text{ м}$ водного стовпчика – вакуум.

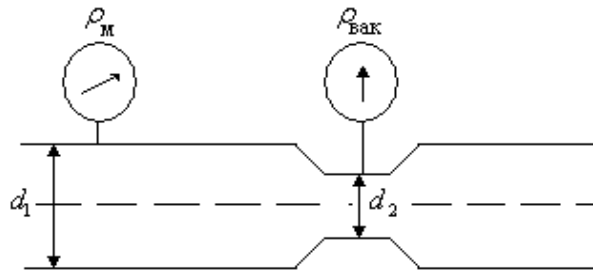


Рисунок 5.6

Задача 7.3 з резервуару по трубі змінного перерізу рідина витікає в атмосферу. Вважаючи рідину ідеальною, визначити швидкість витікання, витрату рідини і тиск на кожній ділянці трубопроводу (рис. 5.7). Побудувати п'єзометричну і напірні лінії, якщо рівень рідини в резервуарі $H, м$; діаметри труб $d_1, d_2, d_3, мм$; густина рідини $\rho, кг/м^3$. Вихідні дані до задачі 7.3 наведені у таблиці 5.1.

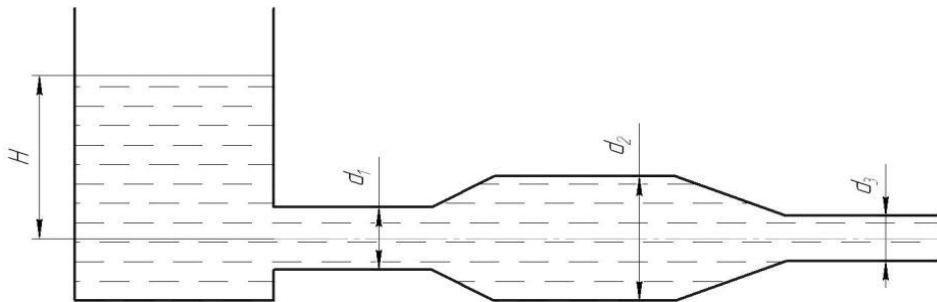


Рисунок 5.7

Таблиця 5.1- Вихідні дані до задачі 7.3

Варіант	$H, м$	$\rho, кг/м^3$	$d_1, мм$	$d_2, мм$	$d_3, мм$
3	3,0	900	32	64	40
2	2,8	950	25	50	32
2	2,6	850	16	32	20
2	2,4	890	40	80	50
2	2,2	1000	50	100	63
2	2,0	700	63	125	70

	1	750	15	30	2
	8				0
	1	910	20	40	3
	6				2
	1	856	40	80	5
	4				0
	1	998	10	20	1
	2				6
	1	835	12	24	1
	0				6
	0	840	20	40	3
	8				2
	0	825	16	32	2
	6				0
	0	915	10	20	1
	5				5
	0	1000	8	16	1
	4				2

Задача 8. Визначте витрату нестисливої нев'язкої рідини у трубопроводі змінного перерізу (рис. 5.8) і побудуйте напірну і п'єзометричну лінії, якщо відомі відмітки z_1 і z_2 , надлишковий тиск на поверхні рідини в резервуарі p_1 і у вихідному перерізі тиск атмосферний - $p_{\text{атм}}$. Діаметри труб d_1, d_2, d_3 . Густина рідини $\rho = 850 \text{ кг/м}^3$. Вихідні дані до задачі 74 наведені у таблиці 5.2.

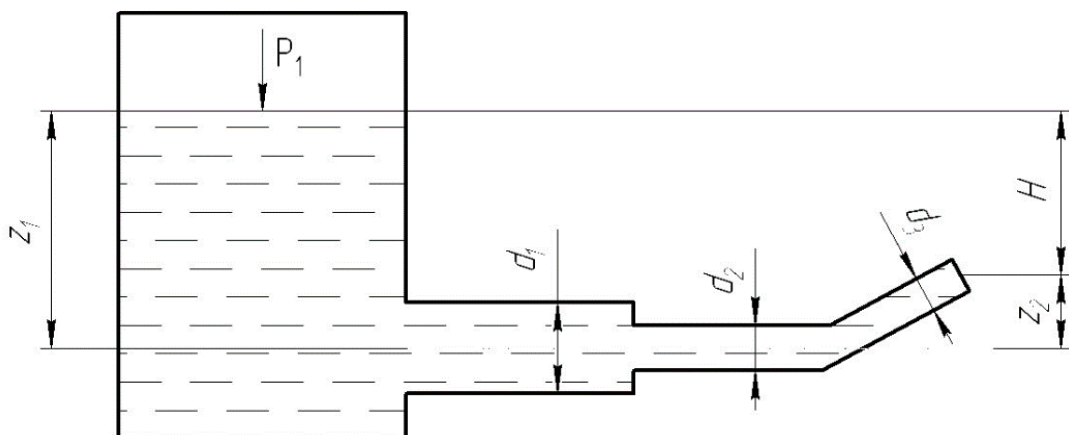


Рисунок 5.8

	2,8	
	2,6	
	2,4	
	2,2	
	2,0	
	1,8	
	1,6	
	1,4	
	1,2	
	1,0	
	0,8	
	0,6	
	0,5	

Питання для контролю знань

Який геометричний сенс має рівняння Д.Бернуллі для елементарної струминки ідеальної рідини ?

Який фізичний і механічний сенс має рівняння Д.Бернуллі для елементарної струминки ідеальної рідини.

Чим відрізняється рівняння Д.Бернуллі для струминки реальної рідини від аналогічного рівняння для ідеальної рідини?

Що називають повним гідродинамічним напором?

Який рух рідини вважають плавно змінним? Які він має особливості?
Який фізичний сенс коефіцієнта Кориоліса? Від чого залежить значення цього коефіцієнта?

Тема 6. Розрахунок параметрів потоку

1. Обговорення основних положень теми та питань самостійного вивчення:

1. Види руху рідин і газів.
2. Параметри і гідравлічні елементи живого перерізу потоку.
3. О'ємна витрата рідини через живі перерізи.

Визначення змоченого периметру та розрахунок перерізів різної конфігурації

2. Опитування.

3. Практичні завдання.

РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ПОТОКУ В КАНАЛАХ

Рух рідини може бути усталеним і неусталеним, рівномірним і нерівномірним, напірним і безнапірним, плавно змінним і раптово змінним, ламінарним і турбулентним.

Усталеним називається такий рух рідини, при якому швидкість і тиск у будь-якій її точці на протязі часу не змінюються. При неусталеному русі швидкість і тиск рідини змінюються з часом.

Усталений рух називається рівномірним, якщо живі перерізи потоку, середні швидкості і місцеві швидкості у відповідних точках всіх живих перерізів однакові. При відсутності цієї умови рух називається нерівномірним.

Напірним називається такий рух рідини в закритому руслі, при якому потік не має власної поверхні, а тиск відрізняється від атмосферного. При безнапірному русі рідини має вільну поверхню, а тиск у всіх точках якої дорівнює атмосферному.

Лінією току називається лінія, проведена в рідині так, що у будь-якій її точці вектор швидкості в даний момент часу направлений по дотичній до неї. Рух рідини називається плавно змінним, якщо кривизна ліній току і кут розходження між ними незначні.

Трубчаста поверхня, утворена лініями току, проведеними через всі точки нескінченно малого замкнутого контуру у рухомій рідині називається трубкою току. Частина потоку, зосереджена всередині трубки току, називається елементарною струминкою. Потік – це сукупність елементарних струминок.

Живим перерізом називається поверхня всередині потоку, нормальна в кожній точці до відповідної лінії току. Частина периметра живого перерізу, що стикається з

твердими стінками, називається змоченим периметром. Відношення площі живого перерізу S до змоченого периметру Π називається гідравлічним радіусом:

$$R = S/\Pi.$$

Для круглої труби при напірній течії $R = d/4$, або $d = 4R$. Гідравлічний діаметр

$$d = 4R.$$

Наприклад, для напірного потоку в трубі прямокутного поперечного перерізу ($b \cdot h$) гідравлічний радіус і гідравлічний діаметр відповідно дорівнюють:

Об'ємною витратою називається кількість рідини, що проходить через живий переріз потоку за одиницю часу. Вона може бути виміряна об'ємним способом

де V – об'єм мірного баку, T – час його наповнення, а також розрахований за формулою

$$= \int u dS,$$

де dS – площа перерізу елементарної площадки, u – місцева швидкість в центрі ваги цієї площадки.

Середньою швидкістю v називається така фіктивна швидкість, однакова для всіх точок живого перерізу, при якій витрата, розрахована за формулою

дорівнювала б фактичній витраті, розрахованій за:

=

При усталеному русі рідини витрата через всі живі перерізи потоку однакова:

$$\int u dS$$

де v_1, v_2, \dots, v_n – середні швидкості, S_1, S_2, \dots, S_n – площа живих перерізів.

Вираз (4.2) називається рівнянням витрати, або рівнянням нерозривності. З нього витікає, що середні швидкості обернено пропорційні площі живих перерізів:

Змочений периметр π – довжина границі живого перерізу, по якому потік контактує з обмеженням. Геометричний периметр π' . $\pi \leq \pi'$

Гідравлічний радіус перерізу

$$R = \frac{A}{\pi d}$$

Для круглого перерізу

$$R = \frac{A}{\pi d} = \frac{\pi d^2}{4\pi d} = \frac{d}{4}$$

Для прямокутного перерізу

$$R = \frac{A}{\pi d} = \frac{bh}{2(b+h)}$$

Для каналу

$$R = \frac{A}{\pi d} = \frac{bh}{b+2h},$$

де A живий переріз, проведений перпендикулярно напрямку стінок потоку або напрямку швидкостей його елементарних струменів.

Приклади розв'язування завдання

Приклад 6.1. Визначити масовий розхід гарячої води в трубопроводі з внутрішнім діаметром $d_{\text{вн}} = 412$ мм при швидкості води $v = 3$ м/сек і густині $\rho = 917$ кг/м.

Розв'язання

$$V = Av = \frac{\pi d_{\text{вн}}^2}{4} v = \frac{3.14 \cdot 0.412^2}{4} 3 = 0.4 \text{ м}^3/\text{сек.}$$

$$m = V\rho_B = 0.4 \cdot 917 = 366.8 \text{ кг/сек.}$$

Приклад 6.2. На прямій ділянці ріки живі перерізи $A_1=50$ м², $A_2=60$ м², $A_3=65.5$ м². Розхід води складає $V = 60$ м³/сек. Визначити швидкості течії у площинах 1, 2, 3.

$A_1 v_1 = A_2 v_2 = A_3 v_3 = V$ – безперервність потоку

Розв'язання

$$v_1 = \frac{V}{A_1} = \frac{60}{50} = 1.2 \text{ м/сек.}$$

$$v_2 = \frac{V}{A_2} = \frac{60}{60} = 1 \text{ м/сек.}$$

$$v_3 = \frac{V}{A_3} = \frac{60}{65.5} = 0.916 \text{ м/сек.}$$

Приклад 6.3. По трубопроводу подається 0.314 м³/сек. Визначити діаметр трубопроводу при швидкості $v = 2$ м/сек.

Розв'язання

$$V = Av = \frac{\pi d_{\text{вн}}^2}{4} v$$

$$d_{\text{вн}} = \sqrt{\frac{4V}{\pi v}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0.314}{3.14 \cdot 2}} = 0.445 \text{ м}$$

Приклад 6.4. Визначити режим руху води у стані насичення трубопроводу діаметром $d = 125$ мм при об'ємному розході $V = 88.2$ м³/год. і динамічній в'язкості $\mu = 186.2 \cdot 10^{-6}$ Па·сек. і густині води $\rho = 1.09 \cdot 10^{-3}$ кг/м³.

Розв'язання

$$Re = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\mu} = \frac{2 \cdot 0.125 \cdot 1.09 \cdot 10^3}{186.2 \cdot 10^{-6}} = 1.18 \cdot 10^6 > 2300 - \text{турбулентний режим.}$$

$$v = \frac{4V}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 88.2}{3600 \cdot 3.14 \cdot 0.125^2} = 2 \text{ м/сек.}$$

$$v = \mu/\rho = 1.2 \cdot 10^{-3} / 1000 = 1.02 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{сек.}$$

Практичні завдання

Задача 1. Визначити середню швидкість рідини в трубопроводі з діаметром 0,9 м, при витраті 0,21 м³/с.

Задача 2. Визначити діаметр трубопроводу з рідиною, що протікає з витратою 500 м³, за годину зі швидкістю 1,5 м/с.

Задача 3. По трубі зі змінним перерізом тече вода. Визначити швидкість у другому перерізі, якщо у першому швидкість дорівнює 0,25 м/с. Відповідно діаметр першого перерізу 1,8 м і другого 1 м.

Задача 4. Конічна труба має діаметри відповідно на вході і виході $d_1 = 400$ мм і швидкість в перерізі на вході і витрату рідини.

Питання для контролю знань

1. Лінія току, траєкторія, трубка току, джерела і стоки.
- . Висновок і фізичне тлумачення рівняння нерозривності.
 - 3. Висновок диференціального рівняння руху ідеальної рідин (Ейлера).
 - . Місцева і миттєва швидкості. Класифікація рухів рідини.
 - . Лінія течії і її властивості.
 - . Поверхня трубки течії і її властивості.
 - . Живий переріз в потоці рідини.
 - . Зміна швидкості в живому (поперечному) перерізі елементарної струминки.
 - . Потік рідини. Середня швидкість в поперечних перерізах потоку.
 - . Витрата рідини потоку.
 - . Закон нерозривності потоку рідини.
 - . В чому полягає принцип Д'аламбера щодо рухомої частинки рідини.
 - . Під дією яких сил знаходиться рухома частинка рідини.

Тема 7. Втрати натиску.

1. Обговорення основних положень теми та питань самостійного вивчення:

- 1 Коефіцієнт гідравлічного тертя.
2. Турбулентний плин. .
3. Ламінарний плин.

2. Опитування.

3. Практичні завдання.

. ВТРАТИ НАПОРУ ПО ДОВЖИНІ І В МІСЦЕВИХ ОПОРАХ. ГІДРАВЛІЧНИЙ РОЗРАХУНОК ТРУБОПРОВОДІВ

Рух в'язкої рідини супроводжується втратами напору, обумовленими гідравлічними опорами. Визначення втрат напору є одним з головних питань будь-якого гідродинамічного розрахунку. Розрізняють два види втрат напору – втрати на тертя по довжині, що залежать від довжини і розмірів поперечного перерізу трубопроводу, його шорсткості, в'язкості рідини, швидкості руху, і втрати у місцевих

опорах – коротких ділянках трубопроводів, в яких відбувається зміна швидкості по величині або напрямку:

$$h_n = h_{mp} + \Sigma h_m.$$

де h_{mp} – втрати на тертя; Σh_m – сума втрат у місцевих опорах.

При русі рідини в круглих трубах постійного перерізу втрати напора на тертя визначаються за формулою Дарсі-Вейсбаха:

$$h_{mp} = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}$$

де λ – коефіцієнт гідравлічного тертя по довжині, або коефіцієнт Дарсі; l – довжина трубопроводу; d – його діаметра; v – середня швидкість течії рідини. Для ламінарного режиму руху в круглій трубі коефіцієнт λ визначається за теоретичною формулою

$$\lambda = 64/Re,$$

в якій Re – число Рейнольдса.

При турбулентному режимі руху коефіцієнт λ залежить від числа Рейнольдса і відносної шорсткості Δ/d (де Δ – еквівалентна шорсткість) і визначається за емпіричними формулами. При цьому розрізняють три області гідравлічних опорів – гідравлічно гладких труб, перехідну і квадратичну.

Для області гідравлічно гладких труб коефіцієнт гідравлічного тертя λ визначається за формулою Блазіуса

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

Область гідравлічно гладких труб має місце при $3000 < Re < 20d/\Delta$. У перехідній області ($20d/\Delta < Re < 500 d/\Delta$) коефіцієнт гідравлічного тертя можна визначити за універсальною (що застосовується для всіх областей) формулою Альтшуля

$$\lambda = 0,11(\Delta/d + 68/Re)^{0,25}.$$

В квадратичній області опору (області гідравлічно шорстких труб) коефіцієнт λ може бути знайдено за формулою Шифринсона

$$\lambda = 0,11(\Delta/d)^{0,25}.$$

Втрати напора у місцевих опорах визначаються за формулою Вейсбаха

де ζ – коефіцієнт місцевого опору; v_2 – швидкість після місцевого опору (в деяких випадках значення коефіцієнта ζ відносять і до швидкості v_1 до місцевого опору). У більшості випадків коефіцієнт ζ визначають за довідковими даними, одержаними на підставі дослідних даних. При раптовому розширенні русла втрати напора при турбулентному русі можуть бути знайдені за теоретичною формулою

$$h_{pp} = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g}$$

де v_1 та v_2 – швидкості до і після раптового розширення.

Простим називається трубопровід сталого або змінного перерізу, який не має відгалужень і в якому витрата рідини постійна по довжині (рис. 7.1). Початковим для гідравлічного розрахунку трубопроводу є рівняння Бернуллі, яке внаслідок сталості швидкостей по довжині приймає вид

$$H = \left(\frac{p_1}{\rho g} + z_1 \right) - \left(\frac{p_2}{\rho g} + z_2 \right) = \left(\lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta \right) \frac{v^2}{2g}$$

рівняння нерозривності (3.7), а також залежності для визначення втрат напору на тертя по довжині (7.1) і в місцевих опорах (7.2).

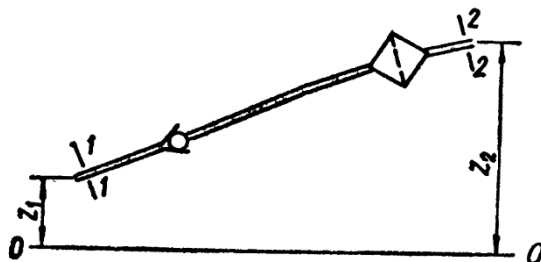


Рисунок 7.1

При розрахунку трубопроводів виникає три основні задачі.

Задача 1. При відомих діаметрі d , довжині l і витраті Q визначити необхідний напір H .

З рівняння (6.3), де $v = \frac{4Q}{\pi d^2}$ одержимо

$$H = \left(\frac{16 Q^2}{2 \pi^2 d^4 g} \right) \left(\lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta \right)$$

Задача 2. Визначити Q , знаючи H та інші величини. Вирішуючи попереднє рівняння відносно Q , одержуємо:

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2gH}{\lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta}}$$

Задача 3. Визначити діаметр трубопроводу, якщо відомі H та інші величини. Щоб знайти діаметр, треба рівняння (7.4) вирішити відносно діаметра. Однак рівняння має складну залежність від діаметра, і задача вирішується або шляхом підбору або графо-аналітично. При вирішенні задачі шляхом підбору задаються величини діаметра до тих пір, поки не буде задоволено рівняння. При графо-аналітичному методі, підставляючи різні величини діаметра в рівняння (7.4), одержують різні величини H , потім за одержаними точками будують залежність H від d і, відклавши по осі H заданий напір, на побудованій кривій знаходять точку з шуканим діаметром.

Приклад розв'язування завдання.

Приклад 7.1. Визначити втрати тиску при русі масла в радіаторі (рис. 7.2), якщо витрата масла $Q = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$. Діаметр колектора радіатора $d_0 = 0,03 \text{ м}$, діаметр трубок $d_{\text{тр}} =$

0,01 м, довжина їх $l_{TP} = 1$ м. Щільність масла $\rho = 900$ кг/м³, кінематична в'язкість $\nu = 6,5 \cdot 10^{-5}$ м²/с.

Р

о Швидкість течії масла в колекторах

з
в
,
я
з
а
н
н
я

$$v = \frac{4Q}{\pi d_0^2} = \frac{4 \cdot 2 \cdot 10^{-4}}{3,14 \cdot 0,03^2} = 0,28 \text{ м/с}$$

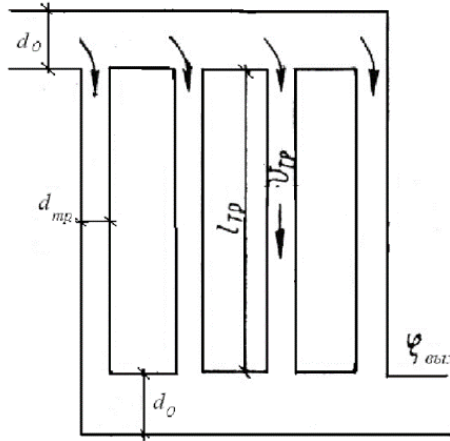


Рисунок 7.2. До прикладу 7.1

Знайдемо втрати тиску в трубках по довжині і втрати на місцеві опори. Всі чотири трубки знаходяться в однакових умовах; отже, витрата в кожній з них

$$Q_{TP} = \frac{1}{4} Q = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$$

Швидкість течії масла в трубці

$$u_{TP} = \frac{4Q}{\pi d_{TP}^2} = \frac{4 \cdot 5 \cdot 10^{-5}}{3,14 \cdot 0,01^2} = 0,63 \text{ м/с}$$

Число Рейнольдса

$$Re_{TP} = \frac{u_{TP} d_{TP}}{\nu} = \frac{0,63 \cdot 0,01}{6,5 \cdot 10^{-5}} = 97$$

Таким чином, протягом в трубках ламінарне. Втрати тиску по довжині знаходимо за формулою:

$$\Delta p_{л} = \frac{32 \rho \nu l_{TP} u_{TP}}{d_{TP}^2} = \frac{32 \cdot 900 \cdot 6,5 \cdot 10^{-5} \cdot 1 \cdot 0,63}{0,01^2} = 1,15 \cdot 10^4 \text{ Па} = 11,5 \text{ кПа}$$

Втрати тиску в місцевих опорах визначаємо за формулою

$$\Delta p_m = \zeta \rho v^2 / 2$$

Δ

коефіцієнти місцевих опорів обчислюємо за формулою:

$$\zeta = \frac{A}{Re} + \zeta_{KB}.$$

По довіднику знаходимо для входу в трубки: $\zeta_{вх.кв} = 0,5$ та $A = 30$; для виходу з трубок $\zeta_{вих.кв} = 1$ та $A = 30$. Підставляючи знайдені значення, отримуємо:

$$\zeta_{вх} = \frac{30}{97} + 0,5 = 0,8$$

Тоді

$$\Delta p_m = \frac{1,3 \cdot 900 \cdot 0,28^2}{2} + \frac{0,8 \cdot 900 \cdot 0,28^2}{2} = 0,07 \text{ кПа}$$

Загальні втрати тиску при русі масла в радіаторі

$$\Delta p_{втр} = \Delta p_{л} + \Delta p_m = 11,5 + 0,07 = 11,57 \text{ кПа.}$$

Приклад 7.2. В якості нагрівальних приборів 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. 7.3). 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.

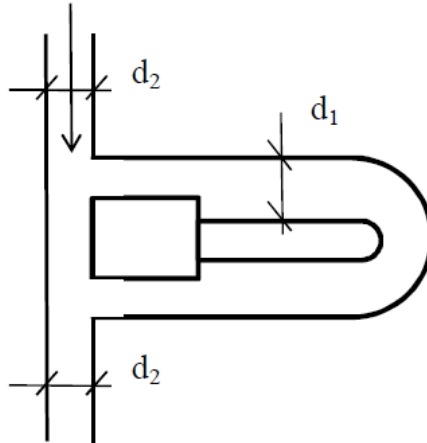


Рисунок 7.3. До прикладу 7.2

Розв'язання. Кінетична в'язкість та питома маса води $\nu = 0,37 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $\rho = 972$ кг/м³ при кімнатній температурі. Число Рейнольдса у трубах які підводять воду дорівнює:

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

Втрати тиску необхідно 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 7.3. Для обмеження витрати води на водопровідній лінії установлюють діафрагму. Надлишковий тиск у трубі до і після діафрагми сталий і дорівнює $p_1 = 6,37 \cdot 10^4$ Па та $p_2 = 2,05 \cdot 10^4$ Па. Діаметр труби $D = 0,076$ м. Визначити необхідний діаметр отвору діафрагми d з таким розрахунком, щоб витрата води в лінії дорівнювала $Q = 0,0059$ м³/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:

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

маємо:

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

Цьому значенню коефіцієнта опору ξ відповідає співвідношення:

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

яке можливо 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:

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

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

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

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

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

Находимо діаметр отвору діафрагми:

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

Коефіцієнт стискання струмини:

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

Практичні завдання

Задача 1. Визначте повні втрати тиску у напірній гідролінії, якщо витрата робочої рідини Q ; л/хв. Діаметр гідролінії D , мм довжина гідролінії l , м. Робоча рідина має густину ρ , кг/м³, кінематична в'язкість ν , сСт. Напірна гідролінія має 2 повороти ($\xi_{пов}$ 0,39) і гідророзподільник, втрати тиску в якому $\Delta P = 0,18$ МПа. Еквівалентна рівномірно-зерниста шорсткість k_e , мм. Вихідні дані до задачі наведені у таблиці 5.

Таблиця 5 - Вихідні дані для задачі

Варіант				
, л/хв				
, мм				
, м				
ρ , кг/м ³				
ν , сСт				
k_e , мм				

Задача 2. Визначити надлишковий тиск в трубопроводі на виході з насоса, якщо витрата води по трубопроводу складає 24 м³/год. Довжина трубопроводу 120 м, висота $h=960$ мм, діаметр труби $d = 100$ мм, еквівалентна шорсткість $\Delta_e = 0,5$ мм, ступінь відкриття засувки 0,7, радіус закруглення відводів $R = 200$ мм.

Задача 3. Визначте повні втрати тиску у напірній гідролінії, якщо витрата робочої рідини Q ; л/хвил, Діаметр гідролінії D , мм довжина гідролінії l , м. Робоча рідина має густину ρ , кг/м³, кінематична в'язкість ν , сСт. Напірна гідролінія має 2 повороти ($\xi_{пов} = 0,39$) і гідророзподільник, втрати тиску в якому $\Delta P = 0,18$ МПа. Еквівалентна рівномірно-зерниста шорсткість k_e , мм. Вихідні дані до задачі 2 наведені у таблиці 6.1.

Таблиця 6.1-Вихідні дані для задачі 2

Варіант				
л/хв				
мм				
м				
ρ , кг/м ³				
ν , сСт				
k_e , мм				

Задача 4. По трубопроводу довжиною 1378 м перекачується 36 м³/год вода з швидкістю 1,28 м/с. Необхідно визначити діаметр трубопроводу і втрати напору, якщо

на ньому розташовано зворотний клапан ($\zeta=1.7$), засувка ($\zeta=0,6$) і поворот на 90° ($\zeta=1,2$). Коефіцієнт гідравлічного тертя λ на трубопроводі дорівнює 0,03.

Питання для контролю знань

Чому в реальних рідинах виникають втрати напору? Які існують втрати напору?

2. Як обчислюються втрати напору по довжині при ламінарному русі?

Які існують зони опору при турбулентному русі?

Чим відрізняються області гладкостінного, доквадратичного та квадратичного опору одна від одної та як в цих областях обчислюється коефіцієнт Дарсі?

Які втрати напору називають місцевими? Як визначаються втрати напору в місцевих опорах в квадратичній області опору?

Причини виникнення місцевих втрат.

Як визначаються втрати напору в місцевих опорах при ламінарному русі?

Як визначити еквівалентну довжину трубопроводу?

. Що таке витратомірна характеристика трубопроводу?

. В чому полягає гідравлічний розрахунок простого (довгого) трубопроводу?

. Визначення витрати рідини при протіканні її через короткий трубопровід.

. Що називається сифонним трубопроводом? Характерні особливості його гідравлічного розрахунку.

. Особливості гідравлічного розрахунку при шляховій витраті рідини в трубопроводі.

. Особливості гідравлічного розрахунку при змішаній витраті, що протікає через трубопровід.

15. Яким чином вибирається економічно вигідна швидкість руху рідини в трубопроводі?

. Що таке гідравлічний радіус? З якою метою вводиться це поняття?

. Що таке еквівалентний діаметр трубопроводу? З якою метою вводиться це поняття?

. Що називається еквівалентною довжиною трубопроводу?

. Що лежить в основі гідравлічного розрахунку складних трубопроводів?

. Принцип гідравлічного розрахунку тупикового трубопроводу.

. Принцип гідравлічного розрахунку паралельно-розгалуженого трубопроводу.

Список використаної літератури

. Технічна гідромеханіка. Гідравліка та гідропневмопривод: підручник /В.О. Федорець, М.Н.Педченко та ін. Житомир: ЖІТІ, 1998. 412с.

2. Мандрус В.І, Лещій Н.П., Звягін В.М. Машинобудівна гідравліка. Задачі та приклади розрахунків. Львів: Світ, 1995. 264 с.

3. Андреева Л.А. Гідрогазодинаміка, термодинаміка та теплотехніка: метод. посібник по лекційному матеріалу/Київський коледж міського господарства Таврійського нац. ун-ту ім. Вернадського, Київ, 2020. 111 с.

4. Т. О. Шевченко. Гідравліка: метод. реком. ХНУМГ ім.ОМ. Бекетова, Харків. 2019. 100с.
Кравченко В.І., Ковальчук Н.В. Гідрогазодинаміка: метод. вказівки до виконання практичних занять для студентів. Кіровоград: КНТУ, 2016. 49 с.

Деякі фізичні властивості рідин при тиску 0,1 МПа

Рідина	Температура, С	Густина, кг/м ³	Питома вага, Н/м ³	В'язкість, , м ² /с
Б е н з и н				0,49 для 0С
автомобільний				
веретенне АУ (ГОСТ				
Для гідравлічних систем АМГ-30 (ГОСТ 6794-75)				
і н д у с				
И-5А				
И-8А				
И-12А				
И-20А				
И-25А				
И-30А				
И-40А				
И-100А				
М а р с і л а л ь н е з а г а л ь н о г о п р и з н а ч е н н я (Г				

С С Т				
	солярове			
	трансформаторне			
	т у р б і н н е (Г С С Т			

Кінетична в'язкість масел при різних температурах

Масло	, м ² /с при °С					
веретенне АУ (ГОСТ 1642-						
для гідравлічних систем АМГ- (ГОСТ 6794-						
90індустріаль не (ГОСТ	И - 2 0 А					
	И - 4 5 А					
	И - 5 0 А (м а ш и н е С У					
трансформатор не з присадкою іюнол						
турбінне (ГОСТ 32-74, П	Т П					

Т Г - 2 2 (з с і р ч и с т и х н а д т						
	Т Г - 3 0 У Т					

Додаток В

Кінетична в'язкість масел при різних температурах

Р і д и н а	С	, Па*с при тиску МПа					
А в т о л							
М а ш и н н е							

Т р а н ф о р м а т о р н е						
--	--	--	--	--	--	--

ГІДРОГАЗОДИНАМІКА

Частина 1
Методичні вказівки
до виконання практичних робіт

Укладачі:

ПОТАПОВ Володимир Олексійович

БІЛИЙ Дмитро Володимирович

Формат 60x84/16. Гарнітура Times New Roman
Папір для цифрового друку. Друк ризографічний.

Ум. друк. Арк. ____

Наклад ____ пр.

Державний біотехнологічний університет
61002, м. Харків, вул. Алчевських, 44